

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE PROCESO EN LA
SIMULACIÓN DE TERMOFORMACIÓN DE PLÁSTICOS CON T-SIM**

JUAN JOSÉ SÁNCHEZ SALAS
MAURICIO VELÁSQUEZ TORO

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN
SANTIAGO DE CALI
2005**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE PROCESO EN LA
SIMULACIÓN DE TERMOFORMACIÓN DE PLÁSTICOS CON T-SIM**

JUAN JOSÉ SÁNCHEZ SALAS
MAURICIO VELÁSQUEZ TORO

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero de Producción

Director
JUAN CARLOS OTERO JARAMILLO
Ing. Mecánico

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN
SANTIAGO DE CALI
2005**

Trabajo aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero de Producción.

Mónica Sarria Y.
Jurado

Lorena Castillo
Jurado

A Dios, a mis padres y a mis hermanos.

Juan José

A mis padres, a mi hermanita y a mi abuela.

Mauricio

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ingeniero Juan Carlos Otero Jaramillo y al Ing. Carlos Serrano la gran colaboración que nos prestaron para la realización de este trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
3. OBJETIVO GENERAL	4
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1 PLÁSTICOS	5
4.1.1 Materias primas de los plásticos.	5
4.1.2 Procedimiento de obtención de los polímeros.	6
4.1.3 Clasificación de los plásticos.	6
4.1.4 Propiedades físicas de los plásticos.	8
4.1.5 Viscoelasticidad de los plásticos.	11
4.1.6 Termoformación de plásticos.	11

	pág.
4.1.7 Simulación de Termoformación de plásticos.	13
5. SELECCIÓN DEL PRODUCTO TERMOFORMADO	19
6. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE TERMOFORMADO	22
6.1 MATERIA PRIMA	22
6.2 TEMPERATURA DE LÁMINA	22
6.2.1 Calentamiento de la lámina.	25
6.3 ESPESOR DE LÁMINA	27
6.4 TEMPERATURA DEL MOLDE	27
6.5 TEMPERATURA DEL PLUG	27
6.6 PRESIÓN DE AIRE DE FORMADO	27
6.7 MATERIAL DEL PLUG	28
6.8 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-PLUG	28
6.8.1 Mecanismos de transferencia de calor.	29

	pág.
6.9 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-CAVIDAD	31
6.10 FORMA DEL PLUG	31
6.11 TIEMPO DE DESCENSO DEL PLUG	31
6.12 RECORRIDO DEL PLUG	32
6.13 TIEMPO DE DURACIÓN DEL AIRE DE FORMADO	32
6.14 ALTURA DEL SENSOR	32
6.15 COEFICIENTE DE FRICCIÓN PLUG-LÁMINA	32
6.16 COEFICIENTE DE FRICCIÓN CAVIDAD-LÁMINA	34
6.17 CAVIDAD	34
7. FORMA DE MEDIR Y/O CALCULAR LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE TERMOFORMADO	35
7.1 MATERIA PRIMA	39
7.2 TEMPERATURA DE LÁMINA	41
7.3 ESPESOR DE LÁMINA	41

	pág.
7.4 TEMPERATURA DEL MOLDE	42
7.5 TEMPERATURA DEL PLUG	43
7.6 PRESIÓN DE AIRE DE FORMADO	43
7.7 MATERIAL DEL PLUG	43
7.8 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-PLUG	44
7.9 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-CAVIDAD	45
7.10 FORMA DEL PLUG	46
7.11 TIEMPO DE DESCENSO DEL PLUG	49
7.12 RECORRIDO DEL PLUG	51
7.13 TIEMPO DE DURACIÓN DEL AIRE DE FORMADO	53
7.14 ALTURA DEL SENSOR	55
7.15 COEFICIENTE DE FRICCIÓN PLUG-LÁMINA	55
7.16 COEFICIENTE DE FRICCIÓN CAVIDAD-LÁMINA	56

	pág.
7.17 CAVIDAD	57
8. SIMULACIÓN DEL PROCESO REAL	58
8.1 DEFINICIÓN DE LA LÁMINA	58
8.2 CREACIÓN DE LA CAVIDAD	59
8.3 CREACIÓN DEL PLUG	60
8.4 CONTROL DE PROCESO	60
8.5 MATERIAL DE PROCESO	62
8.6 PARÁMETROS DE FRICCIÓN Y TEMPERATURA	62
8.7 PROYECTO	63
8.8 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO REAL	64
9. INFLUENCIA DE PARÁMETROS DE PROCESO EN LA SIMULACIÓN	75
9.1 MATERIA PRIMA	76
9.2 TEMPERATURA DE LÁMINA	76
9.3 ESPESOR DE LÁMINA	83

	pág.
9.4 TEMPERATURA DEL MOLDE	84
9.5 TEMPERATURA DEL PLUG	88
9.6 PRESIÓN DE AIRE DE FORMADO	91
9.7 MATERIAL DEL PLUG	94
9.8 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-PLUG	94
9.9 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-CAVIDAD	98
9.10 FORMA DEL PLUG	103
9.11 TIEMPO DE DESCENSO DEL PLUG	107
9.12 RECORRIDO DEL PLUG	110
9.13 TIEMPO DE DURACIÓN DEL AIRE DE FORMADO	114
9.14 ALTURA DEL SENSOR	117
9.15 COEFICIENTE DE FRICCIÓN PLUG-LÁMINA	123
9.16 COEFICIENTE DE FRICCIÓN CAVIDAD-LÁMINA	126

	pág.
9.17 CAVIDAD DEL MOLDE	131
10. MODELO KBKZ	132
11. CONCLUSIONES	138
BIBLIOGRAFÍA	139
ANEXOS	142

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Materiales termoplásticos con estructura amorfa y cristalina.	10
Tabla 2. Comparación entre las características de un producto formado en fase sólida y en fase de fusión.	25
Tabla 3. Radio del plug assist para láminas con baja resistencia a la fricción.	48
Tabla 4. Diagrama del ciclo.	54
Tabla 5. Porcentaje de error de simulación en el eje x.	72
Tabla 6. Porcentaje de error de simulación en el eje y.	73
Tabla 7. Porcentaje de error de simulación en el vértice.	74

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Formado con molde hembra.	16
Figura 2. Formado con molde macho.	16
Figura 3. Acción del plug y la cavidad en la termoformación.	17
Figura 4. Base rectangular de 500 g.	19
Figura 5. Termoformado con plug assist con presión positiva.	21
Figura 6. Fases de proceso para termoformado de polipropileno.	23
Figura 7. Analogía eléctrica con la transferencia de calor.	30
Figura 8. Fuerza de fricción.	33
Figura 9. Ensayo de compresión.	37
Figura 10. Acumulamiento de material en el producto terminado.	39
Figura 11. Dimensiones de la lámina.	42
Figura 12. Forma del plug.	46
Figura 13. Forma del plug.	47
Figura 14. Ahondamiento en el plug.	48
Figura 15. Ejemplos de formas de plugs vs. Formas de envases	49
Figura 16. Foto del sensor.	50
Figura 17. Recorrido del plug.	51
Figura 18. Ajuste de recorrido del plug.	52
Figura 19. Altura del sensor.	53
Figura 20. Cavidad del molde.	57
Figura 21. Lámina.	58
Figura 22. Vista de la cavidad en T-SIM.	59
Figura 23. Vista del plug en T-SIM.	60
Figura 24. Cuadro de control de proceso.	61

	pág.
Figura 25. Material.	62
Figura 26. Cuadro de control de parámetros de fricción y temperaturas.	63
Figura 27. Proyecto.	64
Figura 28. Áreas críticas de venteo en la simulación normal.	65
Figura 29. Área de falla de la tarrina.	66
Figura 30. Esfuerzos residuales en la simulación normal.	67
Figura 31. Ejes de corte para análisis de espesores.	68
Figura 32. Divisiones de la base rectangular 500 g..	68
Figura 33. Distribución de espesores de la simulación de la base rectangular 500 g..	69
Figura 34. Gráfica perfil de espesores $X = 0$.	70
Figura 35. Gráfica perfil de espesores $Y = 0$.	70
Figura 36. Gráfica perfil de espesores Vértice.	71
Figura 37. Zonas de análisis de la base rectangular 500 g..	75
Figura 38. Esfuerzos residuales Temperatura de lamina 153 °C.	77
Figura 39. Esfuerzos residuales Temperatura de lamina 163 °C.	78
Figura 40. Áreas críticas de venteo.	79
Figura 41. Distribución de espesores Simulación 1.	80
Figura 42. Distribución de espesores simulación 2.	80
Figura 43. Gráfica perfil de espesores en $X = 0$ para temperatura de lámina.	81
Figura 44. Gráfica perfil de espesores en $Y = 0$ para temperatura de lámina.	82
Figura 45. Gráfica perfil de espesores en el vértice para temperatura de lámina.	82
Figura 46. Selección de elementos.	83
Figura 47. Esfuerzos residuales Temperatura de molde 25 °C.	85
Figura 48. Esfuerzos residuales Temperatura de molde 35 °C.	85
Figura 49. Distribución de espesores temperatura de molde 25 °C.	86
Figura 50. Distribución de espesores temperatura de molde 35 °C.	86
Figura 51. Distribución de espesores en $X = 0$ para temperatura de molde.	87

Figura 52. Distribución de espesores en $Y = 0$ para temperatura de molde.	87
Figura 53. Distribución de espesores en el vértice para temperatura de molde.	88
Figura 54. Distribución de espesores temperatura del plug 30°C.	89
Figura 55. Distribución de espesores temperatura del plug 50 °C.	89
Figura 56. Distribución de espesores en $X = 0$ para temperatura del plug.	90
Figura 57. Distribución de espesores en $Y = 0$ para temperatura del plug.	90
Figura 58. Distribución de espesores en el vértice para temperatura del plug.	91
Figura 59. Áreas de venteo presión de aire de formado de 6 bares.	92
Figura 60. Distribución de espesores presión del aire de formado 6 bar.	92
Figura 61. Distribución de espesores en $X = 0$ para presión de aire de formado de 6 bar.	93
Figura 62. Distribución de espesores en $Y = 0$ para presión de aire de formado de 6 bar.	93
Figura 63. Distribución de espesores en el vértice para presión de aire de formado de 6 bar.	94
Figura 64. Esfuerzos residuales Transferencia de calor Plug –Lámina.	95
Figura 65. Distribución de espesores en $X = 0$ para Coef. transferencia de calor plug-lámina.	96
Figura 66. Distribución de espesores en $Y = 0$ para Coef. transferencia de calor plug-lámina.	97
Figura 67. Distribución de espesores en el vértice para Coef. transferencia de calor plug-lámina.	97
Figura 68. Esfuerzos residuales Coeficiente transferencia de calor = $424 \frac{W}{m^2 K}$	99
Figura 69. Esfuerzos residuales Coeficiente transferencia de calor = $624 \frac{W}{m^2 K}$	99

	pág.
Figura 70. Distribución de espesores coeficiente transferencia de calor = $424 \frac{W}{m^2 K}$.	100
Figura 71. Distribución de espesores coeficiente transferencia de calor = $624 \frac{W}{m^2 K}$.	101
Figura 72. Distribución de espesores en $X = 0$ para Coef. Transferencia de calor lámina-cavidad.	101
Figura 73. Distribución de espesores en $Y = 0$ para Coef. Transferencia de calor lámina-cavidad.	102
Figura 74. Distribución de espesores en el vértice para Coef. Transferencia de calor lámina-cavidad	102
Figura 75. Radio del plug para la simulación 1.	103
Figura 76. Esfuerzos residuales para radio del plug de 17 mm.	104
Figura 77. Distribución de espesores para radio del plug de 17 mm.	105
Figura 78. Distribución de espesores en $X = 0$ para radio del plug de 17 mm.	105
Figura 79. Distribución de espesores en $Y = 0$ para radio del plug de 17 mm.	106
Figura 80. Distribución de espesores en el vértice para radio del plug de 17 mm.	106
Figura 81. Esfuerzos residuales tiempo de descenso del plug de 140 ms.	107
Figura 82. Distribución de espesores tiempo de descenso del plug de 140 ms.	108
Figura 83. Distribución de espesores en $X = 0$ para tiempo descenso del plug de 140 ms.	109
Figura 84. Distribución de espesores en $Y = 0$ para tiempo descenso del plug de 140 ms.	109
Figura 85. Distribución de espesores en el vértice para tiempo descenso del plug de 140 ms.	110
Figura 86. Esfuerzos residuales recorrido del plug 56 mm.	111

	pág.
Figura 87. Distribución de espesores recorrido del plug 56 mm.	112
Figura 88. Distribución de espesores en $X = 0$ recorrido del plug 56 mm.	112
Figura 89. Distribución de espesores en $Y = 0$ recorrido del plug 56 mm.	113
Figura 90. Distribución de espesores en el vértice recorrido del plug 56 mm.	113
Figura 91. Esfuerzos residuales duración tiempo aire de formado 500 ms.	115
Figura 92. Distribución de espesores en $X = 0$ tiempo de aire de formado 500 ms.	116
Figura 93. Distribución de espesores en $Y = 0$ tiempo de aire de formado 500 ms.	116
Figura 94. Distribución de espesores en el vértice tiempo de aire de formado 500 ms.	117
Figura 95. Configuración de la altura del sensor.	118
Figura 96. Esfuerzos residuales altura sensor 36 mm.	119
Figura 97. Esfuerzos residuales altura sensor 44 mm.	119
Figura 98. Distribución de espesores altura sensor 36 mm.	120
Figura 99. Distribución de espesores altura sensor 44 mm.	121
Figura 100. Distribución de espesores en $X = 0$ altura sensor.	121
Figura 101. Distribución de espesores en $Y = 0$ altura sensor.	122
Figura 102. Distribución de espesores en el vértice altura sensor.	122
Figura 103. Esfuerzos residuales Coef. Fricción plug-lámina 0.5.	123
Figura 104. Distribución de espesores Coef. Fricción plug-lámina 0.5.	124
Figura 105. Distribución de espesores en $X = 0$ Coef. Fricción plug-lámina 0.5.	125
Figura 106. Distribución de espesores en $Y = 0$ Coef. Fricción plug-lámina 0.5.	125
Figura 107. Distribución de espesores en el vértice Coef. Fricción plug-lámina 0.5.	126
Figura 108. Esfuerzos residuales COF lámina-plug 0.3.	127

	pág.
Figura 109. Esfuerzos residuales COF lámina-plug 0.7.	127
Figura 110. Distribución de espesores COF lámina-plug 0.3.	128
Figura 111. Distribución de espesores COF lámina-plug 0.7.	129
Figura 112. Distribución de espesores en $X = 0$ COF lámina-plug.	129
Figura 113. Distribución de espesores en $Y = 0$ COF lámina-plug.	130
Figura 114. Distribución de espesores en el vértice COF lámina-plug.	130
Figura 115. Espesor de apile.	131

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. PLANO BASE RECTANGULAR 500 g.	142
ANEXO B. FICHA TÉCNICA DE CALIDAD DELA BASE RECTANGULAR 500 g.	143
ANEXO C. FICHA TÉCNICA HYTAC	145
ANEXO D. NORMA ASTM D1894 MÉTODO ESTANDAR PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN ESTÁTICA Y CINÉTICA EN LÁMINAS DE PLÁSTICO.	147

RESUMEN

Al igual que en todos los procesos productivos, la termoformación depende de unos parámetros que definen el proceso en sí y a su vez, cuando este proceso es llevado al campo de la simulación depende de esos mismos parámetros o incluso de algunos otros.

La simulación de la termoformación de la base rectangular 500 g., fabricada por la empresa Carpak S.A., sirve de marco para analizar la influencia de los parámetros de proceso en la simulación de termoformación de plásticos.

INTRODUCCIÓN

Al igual que como en casi todas las demás áreas del procesamiento de plásticos, las técnicas de simulación ganan cada día más significado para el proceso del termoformado. La mayor variedad de productos, menor tiempo de entrega y el uso de materiales nuevos obligan al procesador y al constructor de máquinas a hacer uso de menores tiempos de desarrollo. La simulación permite el desarrollo de una geometría optimizada de los moldes y el cálculo de los parámetros adecuados del proceso.

En varias áreas del procesamiento de plásticos se utilizan hoy día técnicas de simulación. La solución de las ecuaciones matemáticas básicas se ejecuta con el método de los elementos finitos (FEM).

La simulación facilita la optimización de la geometría de las piezas o productos termoformados y del proceso de manufactura. Esto ayuda a evitar el desarrollo de fallas. Además por este procedimiento ya se ejecutan muchos ensayos de posicionamiento en la computadora, por lo cual se reducen drásticamente los tiempos de desarrollo de un producto nuevo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Llegada de nuevas tecnologías de simulación de procesos que se ha venido dando en el mundo en la última década nos obliga a capacitarnos en el manejo de dichas herramientas. T-SIM* es un software de simulación del proceso de termoformado de plásticos que predice la distribución final del espesor de la pared, esfuerzos residuales y distribución de temperaturas basado en los parámetros de proceso especificados. Sin embargo no hay un concepto claro de la influencia que tiene la variación de los parámetros de proceso en la simulación del mismo, amén de la dificultad que se presenta para medir y cuantificar los parámetros en el proceso real, lo cual lleva a que en el momento en que se obtengan resultados inadecuados en la simulación de un proceso no se sepa cual es el siguiente paso a seguir, simplemente se recurre a variar los parámetros del proceso al azar hasta encontrar los resultados adecuados.

* Software desarrollado por Accuform, V. 4.35.

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La razón por la cual se desea llevar a cabo este proyecto es brindar una herramienta para manejo del software T-SIM a las personas que lo requieran. En la medida en que los usuarios del software identifiquen claramente la incidencia que tiene en los resultados de la simulación la variación de los parámetros de proceso, el proceso de simulación será menos engorroso y demorado y será entonces cuando se podrán ver las verdaderas ventajas que presenta la simulación del proceso de termoformado en el ahorro de tiempo del diseño óptimo de una pieza.

3. OBJETIVO GENERAL

Optimizar el manejo de software para termoformación de plásticos T-SIM clarificando cuáles son y cómo influyen las variables de proceso.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las variables críticas en el proceso de simulación de termoformado con T-SIM.
- Medir y/o calcular las variables del proceso de termoformación de plásticos.
- Analizar la influencia de las variables en el proceso de termoformación de plásticos.
- Analizar el modelo matemático que el software para simulación de termoformación de plásticos T-SIM utiliza.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 PLÁSTICOS

La palabra 'plástico debe entenderse como un término general que describe una gran variedad de sustancias, las cuales se distinguen entre sí por su estructura, propiedades y composición. A pesar de todo, los plásticos tienen algo en común. Se originan a través del encadenamiento de moléculas muy largas, denominadas macromoléculas. A menudo estas macromoléculas constan de más de 1000 unidades estructurales una detrás de otra, como las perlas de un collar. Como las macromoléculas, y por lo tanto los plásticos, están formados de unidades estructurales sencillas, llamadas monómeros, éstos en general son denominados polímeros.

4.1.1 Materias primas de los plásticos. Las materias primas para la fabricación de los plásticos son sustancias naturales, como la celulosa, el carbón, el petróleo y el gas natural. Las moléculas de estas sustancias tienen en común el hecho de que contienen carbono e hidrógeno. La más importante de las materias primas anteriormente mencionadas es el petróleo. Para producir plásticos a partir del petróleo es necesario dividirlo por destilación en sus diversos componentes. Para ello se saca partido de los diferentes puntos de ebullición de estos componentes. Se separan, entres otros, gas, gasolina, éter y como residuo el alquitrán.

El producto de destilado más importante para la fabricación de plásticos es la gasolina, la cual, una vez destilada, es tratada en un proceso de disociación térmica, en el que es dividida en etileno, propileno, butileno y otros hidrocarburos.

Este proceso también se denomina 'Cracking'. Las proporciones de los diferentes productos de disociación pueden regularse mediante la temperatura, así, por ejemplo, a 850°C se obtiene mas de un 30% de etileno. A partir del etileno se pueden obtener en sucesivas etapas de reacción estireno y cloruro de vinilo, sustancias que a su vez son el punto de partida para obtener plásticos.

4.1.2 Procedimiento de obtención de los polímeros. El proceso por medio del cual se obtienen los polímeros se denomina polimerización. En éste proceso el doble enlace existente entre los 2 átomos de carbono del monómero es roto mediante la acción de un radical. Los radicales son elementos, o grupos de elementos, altamente reactivos, es decir, que tienden a reaccionar con facilidad con otras moléculas.

Durante la ruptura del doble enlace de los átomos de carbono, el electrón libre del radical forma un nuevo enlace con uno de los electrones del enlace roto. El electrón que resta del enlace roto se halla ahora al otro lado de la molécula. Este lado donde se encuentra el electrón libre puede a su vez romper un nuevo doble enlace. De esta manera el conjunto crece hasta formar una larga cadena, la cual solo deja de crecer cuando se encuentran dos extremos de la cadena o cuando uno de ellos se une a un radical.

Para la obtención de un plástico por polimerización pueden emplearse a la vez uno o mas tipos de monómeros. Si solo se emplea un tipo de monómero se obtiene un homopolímero. Si se fabrica el polímero a partir de dos o mas monómeros distintos, se habla de copolimerización y el resultado final es un copolímero.

4.1.3 Clasificación de los plásticos. Generalmente los plásticos se clasifican de acuerdo a las propiedades físicas y químicas de sus componentes en tres grupos principales: Termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Los termoplásticos son resinas con una estructura molecular lineal que durante el moldeo en caliente no sufren ninguna modificación química.

La acción del calor causa que estas resinas se fundan, solidificándose rápidamente por enfriamiento en el aire o al contacto con las paredes del molde. Dentro de ciertos límites, el ciclo de fusión-solidificación puede repetirse; sin embargo, debe tenerse en cuenta que el calentamiento repetido puede resultar en la degradación de la resina.

Las resinas termoestables pueden ser fundidas una sola vez. Las resinas de este grupo, que se caracterizan por tener una estructura molecular reticulada o entrelazada, se funden inicialmente por la acción del calor, pero enseguida, si se continúa la aplicación del calor, experimentan un cambio químico irreversible, el cual provoca que las resinas se vuelvan infusibles (no se plastifican) e insolubles. Este endurecimiento es causado por la presencia de catalizadores o de agentes reticulantes.

El grupo de los elastómeros comprende los cauchos o hules naturales y sintéticos, y se caracterizan por una elevada elongación del orden entre el 200 y el 1000%. Las propiedades elásticas de los hules naturales o sintéticos alcanzan sus valores máximos después de un apropiado tratamiento de vulcanización o curado con azufre o peróxidos. La vulcanización transforma la estructura molecular de los hules, los cuales después de ser tratados, se convierten en infusibles y mas resistentes a la acción de los agentes químicos.

Las propiedades elásticas de los hules se conservan por un largo periodo, si las condiciones ambientales y las temperaturas de trabajo se mantienen dentro de ciertos límites.

4.1.4 Propiedades físicas de los plásticos. En el pasado los plásticos fueron utilizados como materiales sustitutos de otros materiales (metales, madera, etc.) no siempre con buenos resultados. Sin embargo la difusión y el uso generalizado de los polímeros han permitido tener un conocimiento más amplio y una aplicación mas apropiada de estos materiales.

Las propiedades de un material plástico dependen en primer lugar de las características físico-químicas de la resina base y de los aditivos usados para mejorar o modificar alguna propiedad de dicha resina.

En general los materiales termoplásticos con estructura lineal pueden ser subdivididos en dos subgrupos con referencia a su acomodo molecular:

- Polímeros con estructura amorfa.
- Polímeros con estructura parcialmente cristalina.

La diversa estructura molecular no sólo influye en el comportamiento en el proceso de fusión y solidificación, sino que también determina las propiedades físicas y mecánicas.

En los polímeros con estructura amorfa la fusión no se realiza a una temperatura determinada. Por lo tanto no existe un punto de fusión preciso; en su lugar el material pasa gradualmente, a medida que la temperatura se aumenta, del estado sólido a un estado viscoso hasta convertirse finalmente en un fluido.

En este amplio intervalo de temperatura de trabajo los materiales amorfos pueden obviamente ser transformados (por inyección, extrusión, termoformado, etc.) dentro de límites de temperatura bastantes amplios.

En estos materiales amorfos (sin refuerzos fibrosos u otras cargas inertes), la contracción en el moldeo está limitada entre 0.3% y 0.9%. Los mismos polímeros con cargas o refuerzos fibrosos presentan valores de contracción inferiores.

Los polímeros con estructura parcialmente cristalina, constituidos por partes amorfas y por partes cristalinas, presentan un característico punto de fusión que corresponde a la transición del estado sólido al estado fluido. El intervalo de transformación está por lo tanto limitado a unos pocos grados centígrados, ya que un poco abajo del punto de fusión, el material está todavía sólido y no se puede trabajar. Por otra parte, no es prudente superar mucho la temperatura de fusión porque puede intervenir el fenómeno de la degradación térmica del material.

Estos polímeros con estructura semicristalina tienen una contracción mucho mas elevada con respecto a los materiales amorfos. La contracción para un polímero no reforzado varía del 1% al 5%. Además después del moldeo se identifican en diferente medida, fenómenos de posterior contracción. Todos los refuerzos fibrosos y las cargas inertes (fibra de vidrio, fibra de asbesto, mica, etc.) ayudan a mejorar las características mecánicas, térmicas o eléctricas y contribuyen a reducir tanto la contracción del proceso como la contracción posterior.

La estructura semicristalina hace a estos materiales más resistentes a los agentes químicos y menos sensibles a los aumentos de temperatura en cuanto que mantienen las características de resistencia mecánica y de rigidez hasta la proximidad del punto de fusión.

Tabla 1. Materiales termoplásticos con estructura amorfa y cristalina.

Termoplásticos con estructura amorfa		Intervalo de fusión °C
	Símbolo ISO	
ABS copolímero	ABS	170-200
Poliestireno	PS	130-160
Poliestireno resistente al impacto	SB	130-160
Acrilinitrilo-estireno	SAN	140-170
Acetato de celulosa	CA	130-170
Propionato de celulosa	CP	130-170
Policarbonato	PC	220-260
Polimetil metacrilato	PMMA	150-180
Óxido de polifenileno	PPO	240-270
Cloruro de polivinilo	PVC	130-160
Termoplásticos semicristalinos		Temperatura de trabajo °C
	Símbolo ISO	
Polietileno (baja densidad)	PE	~ 110
Polietileno (alta densidad)	PE	~ 130
Polipropileno	PP	~ 165
Poliamida 66	PA 66	~ 255
Poliamida 610	PA 610	~ 220
Poliacetal (homopolímero)	POM	~ 175
Poliacetal (copolímero)	POM	~ 165
Polietileno-Terftalato	PETP	~ 255
Fluorotileno-propileno copolímero	FEP	~ 270
Etileno-Tetrafluoruro etileno copolímero	ETFE	~ 270
Nota: Todos los valores corresponden a polímeros sin refuerzos fibrosos ni cargas de otro tipo.		

Sin embargo, la temperatura máxima de trabajo para los productos moldeados son, para cualquier material, bastante más bajas que la temperatura de ablandamiento o de fusión.

4.1.5 Viscoelasticidad de los plásticos. La reología de los polímeros entendida como el estudio de fluidez de los materiales plásticos fundidos, ha aclarado la propiedad y el comportamiento de los mismos en los procesos de transformación de polímeros.

El comportamiento reológico relacionado con la viscoelasticidad es quizá uno de los más relevantes para la descripción de un material. En general la viscoelasticidad es la combinación de propiedades características de líquidos (pérdidas disipadoras viscosas) y sólidos (almacenamiento de energía elástica). Por lo tanto, una definición general de los materiales viscoelásticos incluye dos componentes, la energía potencial elástica y la intensidad de pérdidas disipadoras.

El comportamiento viscoelástico de los materiales puede ser considerado como un desarrollo retardado de tensiones y deformaciones en el tiempo.

4.1.6 Termoformación de plásticos. Por Termoformación de plásticos se entiende el moldeo de plásticos por acción del calor y fuerza. Existe una gran variedad de procesos técnicos. Los métodos mas usados son aquellos que aplican una fuerza basada en aire a presión o vacío.

El proceso general es el siguiente: La lámina de plástico es calentada a una determinada temperatura para alcanzar el estado termoplástico. A continuación es moldeado y por último enfriado. Estas tres etapas se denominan calentamiento, moldeo y enfriamiento, respectivamente.

En la etapa de calentamiento la lámina de plástico es calentada por convección, por contacto o por radiación infrarroja. Este último es el método más común, ya que permite suministrar energía directamente al interior del plástico. De este modo se consigue calentar de forma rápida y uniforme toda la lámina de plástico sin que su superficie sufra peligro de sobrecalentamiento.

En la etapa de moldeo la lámina de plástico, ya caliente, es tensada sobre un bastidor y por medio de aire a presión o vacío, se estampa o se presiona contra la pared de un molde. Una desventaja del proceso es que solo una de las caras copia exactamente el molde, lo cual redunda es una distribución de espesores irregular. Para minimizar este efecto, suele pre-estirarse la lámina antes del moldeo propiamente dicho. Esto se realiza por medio de un macho llamado plug.

La etapa de enfriamiento da comienzo tan pronto como la lámina caliente entra en contacto con el molde, mas frío. Con el fin de reducir el tiempo de enfriamiento, puede refrigerarse el molde y utilizar materiales de alta conductividad térmica en la fabricación de éste.

- Máquinas de termoformación de plásticos. Las máquinas de termoformación industriales son tan variadas como los productos diseñados a producir.

Ellas van desde la relativamente simples, como la shallow-draw, una máquina manejada manualmente, hasta una máquina rotativa compleja, de microordenador controlado y las máquinas en línea diseñadas para aumentar la producción y eficiencia, y las mas recientes termoformadoras llamadas “totalmente eléctrico”.

Cualquier máquina de termoformación debe estar provista de lo siguiente:

- Un método para calentar la lámina hasta la temperatura de formado.

- Un dispositivo para sujetar y mantener la lámina plástica durante el calentamiento y posicionarla para el formado.
- Un dispositivo para abrir o cerrar el molde sobre la lámina plástica y otro para mover la lámina sujeta sobre el molde.
- Un sistema de vacío.
- Un sistema de presión de aire.
- Controles para manejar las diferentes operaciones y para controlar las variables.
- Dispositivos de seguridad.

4.1.7 Simulación de Termoformación de plásticos. Al igual que en casi todas las demás áreas del procesamiento de plásticos, las técnicas de simulación ganan cada día más significado para el proceso del termoformado. La mayor variedad de productos, menor tiempo de entrega y el uso de materiales nuevos obligan al procesador y al constructor de máquinas a hacer uso de menores tiempos de desarrollo. La simulación permite el desarrollo de una geometría optimizada de los moldes y el cálculo de los parámetros adecuados del proceso.

En varias áreas del procesamiento de plásticos se utilizan hoy día técnicas de simulación. La solución de las ecuaciones matemáticas básicas se ejecuta con el método de los elementos finitos (FEM). Se pueden diferenciar dos áreas de principal aplicación de esta técnica:

- El análisis estructural para la disposición mecánica de los módulos.
- La simulación del proceso para el cálculo previo del procedimiento de manufacturas.

El análisis estructural es un área de aplicación clásica de la simulación y se desarrolla desde hace más de tres décadas. Bajo la utilización del análisis de estructuras se pueden dimensionar los módulos conforme a su carga, se puede estimar la vida útil de los módulos con carga dinámica y se puede calcular el

comportamiento de deformación con cualquier carga. En esta forma se puede calcular el comportamiento del recalado, abollamiento y del pandeo de las piezas termoformadas. La simulación del proceso hace posible el cálculo de la distribución resultante del espesor de la pared para piezas termoformadas en dependencia con el parámetro del proceso. Con la simulación se puede analizar la influencia de diversas geometrías del plug assist y del parámetro de calentamiento sobre la distribución resultante del espesor de la pared resultante de la pieza formada.

Con la aplicación del análisis estructural se optimiza la geometría de la pieza formada y con la simulación del proceso se optimiza el proceso de manufacturas. La ingeniería del proceso y de la pieza de forma asistida por computador (Computer Aided Engineering, CAE) incorpora ambas simulaciones en el proceso de desarrollo de nuevos productos.

Para el producto nuevo se elabora inicialmente bajo uso del CAD un diseño de manufacturas ideal. El conjunto de datos CAD se puede utilizar luego como base para la representación geométrica en la simulación. En el análisis de la estructura a continuación se calcula y evalúa el comportamiento mecánico del diseño de la pieza de forma. En esta fase por ejemplo la geometría se puede optimizar repetidas veces hasta que se haya encontrado el diseño de la pieza de forma con el peso más bajo posible, el cual apenas cumple los requerimientos mecánicos. La geometría se optimiza en esta fase de desarrollo conforme a los criterios mecánicos.

En la simulación a continuación del proceso se comprueba la factibilidad de la fabricación de esta geometría optimizada. En esta fase se calcula la distribución resultante del espesor de la pared, la cual por ejemplo resulta para diversas geometrías de los plug assist y campos de temperatura. La pieza formada con los espesores de la pared resultantes del proceso se puede comprobar a

continuación en un renovado análisis de la estructura para determinar su comportamiento mecánico. Después de la optimización de la pieza de forma y del proceso se encuentra a disposición el conjunto de datos CAD como base para el control CNC de las máquinas para la fabricación del molde.

El procedimiento esbozado facilita con ello la optimización de la geometría de las piezas y del proceso de manufactura. Esto ayuda a evitar el desarrollo de fallas. Además por este procedimiento ya se ejecutan muchos ensayos de posicionamiento en la computadora, por lo cual se reducen drásticamente los tiempos de desarrollo de un producto nuevo.

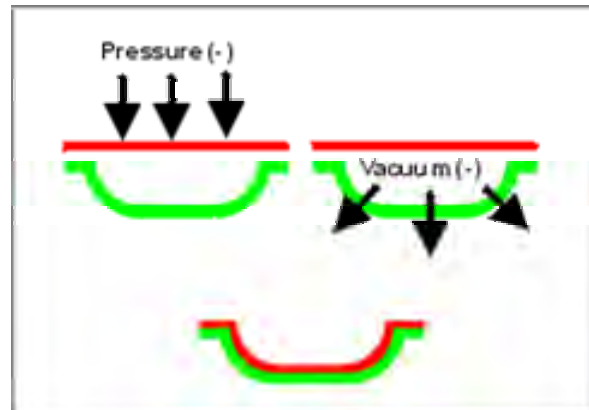
- T-SIM. Es un software de simulación de termoformación de plásticos desarrollado por la empresa checa Accuform con el apoyo de un consorcio de 11 empresas termoformadoras europeas. Gracias a este soporte, los desarrolladores del T-SIM tienen conocimiento de los problemas reales que se presentan en la industria termoformadora, lo cual ayuda a mejorar cada día mas el paquete de software.

T-SIM predice la distribución de espesores finales de la pared del producto simulado basado en parámetros específicos de proceso (Presión del aire, temperatura de la lámina, velocidad de formación, etc.).

El T-SIM ofrece la forma de simular diferentes tipos de termoformación utilizados en la industria de los plásticos para formar una gran variedad de piezas y productos. La maquinaria mas utilizada maneja, ya sea con presión positiva o con presión negativa (vacío), los siguientes tipos de formado:

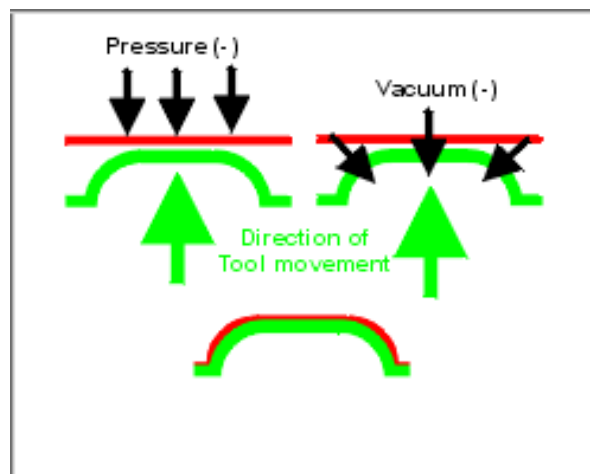
- Formado con molde hembra (formado negativo)

Figura 1. Formado con molde hembra.



- Formado con molde macho (formado positivo)

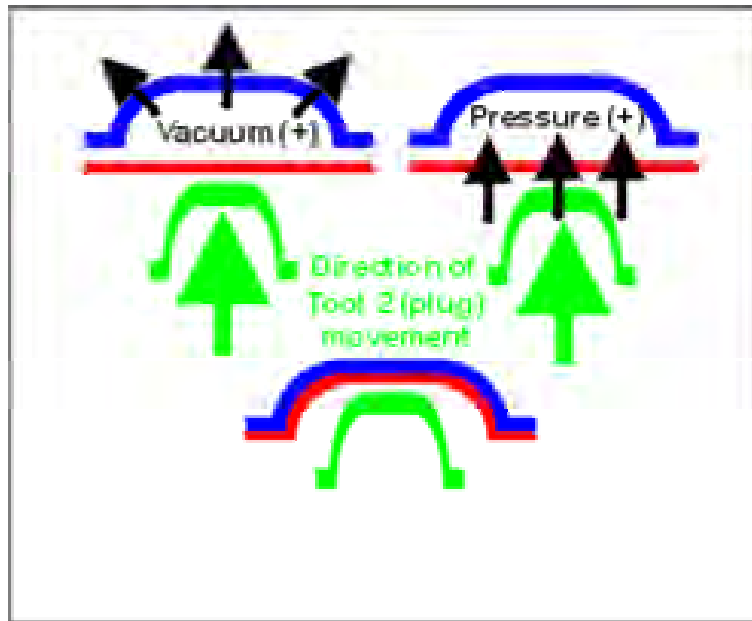
Figura 2. Formado con molde macho.



- Formado con la asistencia de un plug, que es el termoformado utilizado para la fabricación del producto base rectangular 500 g, en donde la cavidad se definirá con un comportamiento Upper (arriba) y no se desplazará, y el plug con un comportamiento Lower (abajo), el cual si tendrá movimiento.

La acción de las herramientas (plug y cavidad) será definida como lo muestra la figura 3.

Figura 3. Acción del plug y la cavidad en la termoformación.



Características del T-SIM:

- Simula el proceso de termoformación positiva y negativa de plásticos, con o sin asistencia de un plug.
- Permite personalizar el espesor y la temperatura inicial de la lámina.
- La dependencia tiempo-deformación está descrita por el modelo matemático KBKZ.
- La dependencia de temperatura está descrita por la ecuación WLF.
- Contiene una amplia base de datos de materiales, tales como PP, PE, PS, ABS, PET, etc..
- Permite importar archivos en 3D de paquetes de software CAD.
- Tiene en cuenta la fricción entre los materiales plásticos y las herramientas.
- Tiene en cuenta la transferencia de calor entre el material y las herramientas y el material y el aire.
- Contiene ejemplos de problemas típicos de termoformación de plásticos.

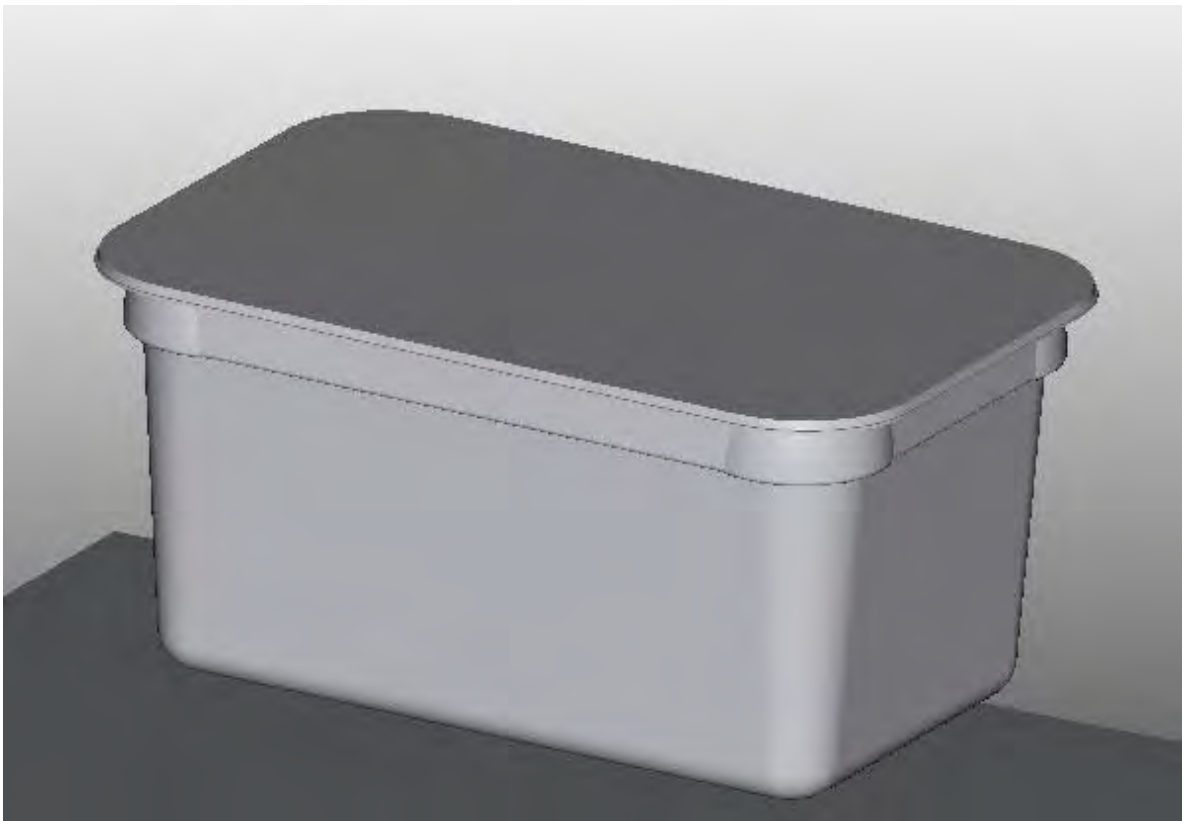
- Permite crear reportes de resultados en HTML* y VRML*.
- Interfase interactiva bastante amigable.
- Mapas 3D a color de temperaturas, tensiones, etc. y cortes 3D que permiten una mejor visualización de los resultados de la simulación.
- Análisis de las áreas críticas de venteo.
- Permite exportar el archivo de animación al formato de Windows media player.
- Visualización del contacto entre el material plástico y las herramientas.
- Soporte técnico vía Internet.
- Análisis de contracciones y alabeos.
- Análisis de tiempo de enfriamiento.

* Tipos de archivo utilizados para publicar información en Internet.

5. SELECCIÓN DEL PRODUCTO TERMOFORMADO

El producto que se escogió para el desarrollo del proyecto es la base rectangular de 500 g. (Figura 4), producto de la línea de empaques termoformados de la empresa Carpak S.A. división Visipak (Ver Anexo A).

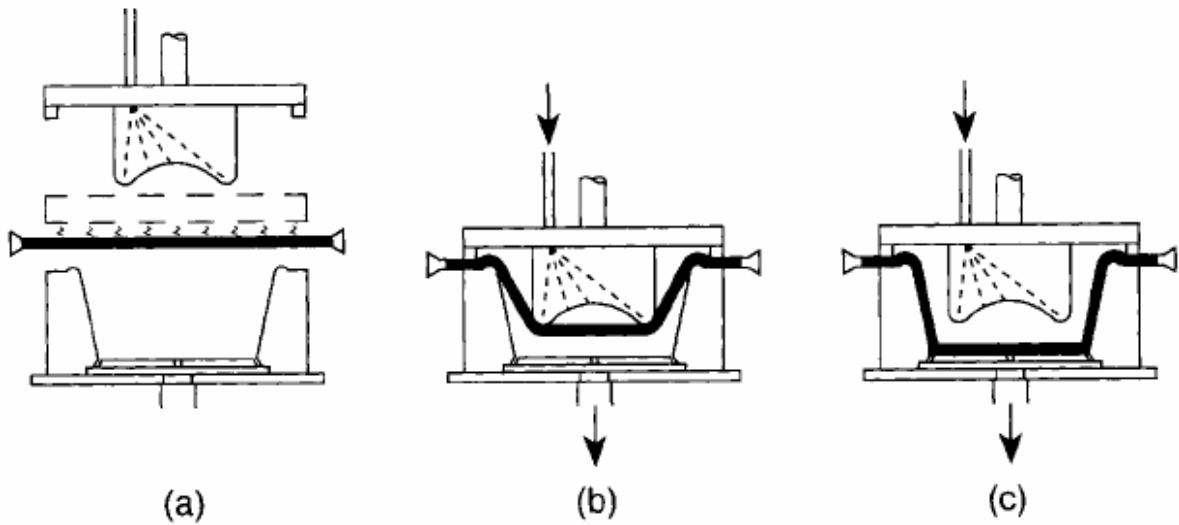
Figura 4. Base rectangular de 500 g.



La razón por la cual se escogió este producto es la geometría compleja que presenta, ya que no es simétrica en todos sus ejes, por lo cual puede presentar diferentes problemas en su manufactura, como una mala distribución del material en el producto. Esto hace que el desarrollo del proyecto presente un grado mayor de dificultad.

Existen diferentes métodos utilizados para efectuar el proceso de termoformación. En el caso del producto escogido, la base rectangular de 500 g, se utiliza termoformado con plug assist con presión positiva, donde el plug es una herramienta de un material sintético especialmente desarrollado para el proceso de termofomación que tiene un bajo coeficiente de transferencia de calor para tratar de evitar que el plug robe el mínimo de calor de la lámina. El plug es usado principalmente cuando el proceso básico lleva variaciones desmedidas en el espesor de pared de producto final. El Plug es una herramienta que cumple las demandas específicas de una cavidad de molde individual. El uso del plug es beneficioso cuando la relación de dibujo de la cavidad (la relación de profundidad para el área proyectada) del producto es alta, y cuando el producto incluye filos, esquinas y otras características en donde es probable que ocurra un estiramiento y adelgazamiento excesivo como en el caso del producto base rectangular 500g. En el proceso con plug, la lámina es calentada hasta la temperatura de proceso, se sujeta normalmente contra la cara del molde, entonces uno o más plugs assist especialmente formados son avanzados contra la lámina para estirla en las áreas de contacto con el plug. En un molde grande, pueden existir diferentes plugs específicamente diseñados para características diferentes en el molde. En el caso de la base rectangular 500 g se utiliza un molde multi-cavidades que está provisto con un plug igual para cada cavidad. Tan pronto como el plug comienza el recorrido, puede existir pre-estiramiento adicional de la lámina que se deriva de un efecto de ola alrededor del plug. Esto es causado por aire desplazado de la celda cerrada formada por la lámina y la cavidad del molde. Este efecto está ausente si la cavidad es proveída de aberturas de venteo. El plug se lleva hasta el final de su recorrido. El formado final del producto se logra al forzar la lámina pre-estirada con aire a presión que entra, haciendo que se despegue la lámina de las áreas en contacto con el plug y que se adhiera totalmente a la cavidad del molde (Figura 5). La técnica con plug assist también se usa frecuentemente con presión negativa o de vacío.

Figura 5. Termoformado con plug assist con presión positiva.



- (a) La lámina es calentada a temperatura de formación
- (b) El plug assist es conducido arrastrando la lámina que está sujeta contra la cara del molde
- (c) La fuerza producida por la presión del aire cubren en contacto íntimo las paredes de la cavidad del molde.

6. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE TERMOFORMADO

En primera instancia se definirán los conceptos generales de cada uno de los parámetros que influyen en el proceso de termoformación con plug assist con el cual se fabrica el empaque plástico base rectangular 500 g., y posteriormente se definirán cuales son los valores de cada uno de los parámetros que influyen en la termoformación de la base rectangular 500 g..

6.1 MATERIA PRIMA

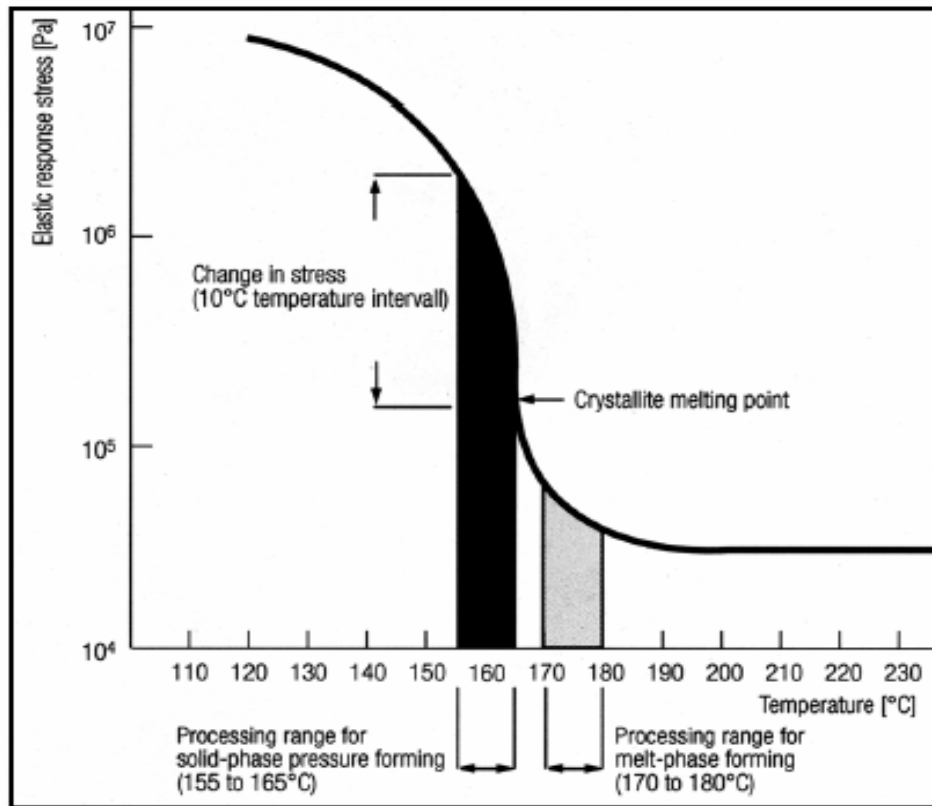
Para la fabricación de la tarrina de base rectangular 500 g se utiliza polipropileno (PP). Esta polyolefina se ha convertido en la más versátil de la familia, dado su rápido aumento y continuo uso. Los primeros polímeros, producidos en 1950, presentaban un bajo rendimiento durante la polimerización y el porcentaje de polímeros atácticos producidos era alto (10%), además se tenía un pobre control sobre peso molecular. El desarrollo de catalizadores de alta actividad en 1970 mejoró los beneficios dramáticamente y casi eliminó la producción de la forma atáctica. Los polímeros isotácticos resultantes eran altamente estéreoregulares. Los polipropilenos son más resistentes al calor y resisten más a los productos químicos que otros materiales termoplásticos de igual costo. De igual forma, los polipropilenos tienen una absorción de agua insignificante y propiedades eléctricas excelentes, además son fáciles de procesar.

6.2 TEMPERATURA DE LÁMINA

Existen dos estrategias de proceso distintas para termoformar polipropileno. Dado que es un material semicristalino puede ser procesado por debajo o por encima del punto de fusión cristalino. Cuando el formado es llevado a cabo debajo del

punto de fusión cristalino es conocido como formado en fase sólida; el formado en fase de fusión es efectuado a temperaturas sobre el punto de fusión cristalino.

Figura 6. Fases de proceso para termoformado de polipropileno.



El formado en fase sólida del polipropileno es llevado a cabo a temperaturas entre 155°C y 165°C; el punto intermedio del rango es normalmente conocido como la configuración óptima. A valores de temperatura por debajo estas condiciones la lámina es relativamente fuerte y resistente para formarse. La desventaja es que la presión simplemente puede ser insuficiente para formar la lámina enteramente. La asistencia del plug es aconsejable para el pre-estiramiento de la lámina. La magnitud de la fuerza necesitada para formar la lámina en la fase sólida es notablemente dependiente de la temperatura, y aún dentro del estrecho rango recomendado de trabajo puede variar según un grado de magnitud. El formado en fase sólida es efectivo con todos los grados de polipropileno para termoformación.

La fase de fusión en la termoformación es efectuada en el rango de temperaturas entre 170 °C y 180°C y requiere grados de polipropileno con una alta resistencia a la fusión. Los grados convencionales tienen una resistencia al hundimiento *insuficiente para ser formado con buen resultado por este método.

La resistencia al hundimiento está relacionada con el peso molecular y la distribución del peso molecular y está expresada por la viscosidad del material. El termoformado con grados altos de fusión es formulado para optimizar estas características, generalmente usando ramificaciones en largas cadenas para impartir el comportamiento necesario.

Las dos técnicas dan por resultado productos con características más bien diferentes. El termoformado en la fase de fusión requiere menos fuerza y por lo tanto genera niveles de esfuerzos residuales inferiores en el producto terminado. La menor resistencia a la tensión de la lámina durante el formado también tiende a producir un adelgazamiento más uniforme en la pared del producto y por tanto se reducen las variaciones del espesor de pared.

Sin embargo, el calentamiento sobre el punto de fusión cristalino produce una estructura de lámina amorfa, la cual se re-cristaliza durante el enfriamiento para producir un formado con disminución de transparencia pero con mejor resistencia al calor. Al calentar la lámina por encima del punto de fusión cristalino se presentan bajos niveles de esfuerzos residuales, que dan por resultado una tendencia reducida a la distorsión por calentamiento de la forma del producto y evita que el producto presente una reversión a la forma de la lámina original. Por esta razón, el termoformado en la fase de fusión es a menudo preferido para envases de polipropileno para microondas. Sin embargo, la termoformación de fase sólido moderna puede producir también envases capaces de soportar estas

* Resistencia de la lámina al estiramiento provocado por el plug.

condiciones, particularmente cuando son termoformados de una lámina co-extruida con una película multicapa.

Tabla 2. Comparación entre las características de un producto formado en fase sólida y en fase de fusión.

Propiedades	Formado Fase Sólida	Formado Fase de Fusión
Distribución de espesores		Mas uniforme
Esfuerzos residuales	Mayores	Menores
Propiedades ópticas	Mas claras	
Propiedades mecánicas	Mas fuertes	
Resistencia al calor		Mayor

6.2.1 Calentamiento de la lámina. El proceso de calentamiento de la lámina es de importancia crítica en el proceso de termoformación, tanto económica como técnicamente. La calefacción explica cerca del 80% de la demanda de energía total en termoformación, así la eficiencia en el calentamiento ejerce una influencia muy importante en la economía del proceso.

Técnicamente, el sistema de calentamiento debe satisfacer demandas exactas. El calor se puede transferir a la lámina sólo por sus superficies exteriores, pero para termoformar con calidad y consistencia se requiere que el calentamiento sea uniforme a lo largo del grosor de lámina y en su núcleo. Esto es particularmente difícil de lograr con el polipropileno, el cual se caracteriza por su alta entalpía y baja conductividad térmica.

Adicionalmente, y particularmente para el polipropileno, el rango de temperaturas del proceso puede ser muy estrecho, requiriendo controles de temperatura precisos.

La calefacción es llevada a cabo por radiación, convección o medios de conducción. En el caso de la máquina termoformadora que fabrica la base rectangular 500 g. se utilizan resistencias eléctricas que transfieren el calor a la lámina por medio de convección. Cuando se usa radiación o conducción, existe la opción para aplicar el calor a una o ambas superficies de la lámina. En el caso de convección, ambos lados de la lámina serán calentados.

Dada la dificultad de calentar el núcleo de la lámina uniformemente, es preferible calentar ambas superficies de la lámina. El máximo espesor de lámina que se puede calentar por una sola superficie para que sea efectivo el calentamiento es de alrededor de 1 mm.

La temperatura de termoformación para la lámina de polipropileno depende de si se está practicando un formado en la fase sólida o en la fase de fusión. En cada caso, el rango de temperatura recomendado para el proceso es de 10°C.

En el formado por fase sólida, la fuerza que se exige para formar la lámina varía sustancialmente dentro del rango recomendado de temperatura; la variación es mucho más pequeña en el formado por fase de fusión. Cuando el formado es llevado a cabo a temperaturas de inferior rango al de la fase sólida, el producto tendrá mayor grado de orientación de la lámina y mayor transparencia, pero el producto tendrá una distribución menos uniforme del espesor de pared cuando es comparado con uno que se termoformó con una temperatura de lámina en la parte más alta del rango. Estas variaciones se combinan para afectar la resistencia de tensión del producto en una manera compleja. Por ejemplo, las variaciones de espesor de pared disminuyen la resistencia a la tensión mientras que aumenta la orientación de la lámina. Esto significa que la configuración óptima de la temperatura depende de la geometría individual del producto y cualquier estandarización de este parámetro de proceso se debe hacer con cuidado. Se nota que con muy pequeñas variaciones en la temperatura de la lámina se puede

tener un efecto marcado en las propiedades del producto terminado, lo cual confirma la importancia de controles de temperatura precisos para el calentamiento de la lámina de polipropileno.

6.3 ESPESOR DE LÁMINA

El espesor de la lámina está dado por la cantidad de material requerido para que el producto tenga el peso deseado.

6.4 TEMPERATURA DEL MOLDE

La temperatura del molde o cavidad en el proceso de termoformado es una variable que tiene cierta relevancia debido a que la cavidad actúa como medio de enfriamiento del producto. El molde es enfriado por medio de canales por donde circula agua a una temperatura que se encuentra en un rango de 4 a 8 °C*.

6.5 TEMPERATURA DEL PLUG

Pese a que la función principal del plug es la de ayudar a formar la lámina, éste también enfría la lámina debido al contacto que existe entre plug y lámina lo cual produce una transferencia de calor por conducción de la lámina al plug.

6.6 PRESIÓN DE AIRE DE FORMADO

La función de la presión del aire es la de despegar la lámina de los puntos de contacto con el plug y adherirla contra las paredes de la cavidad, la cual contiene la forma del producto.

* Rango de temperatura recomendado por el fabricante de la máquina termoformadora Illig.

6.7 MATERIAL DEL PLUG

El plug assist es usado para lograr una distribución uniforme de espesores en el producto final

El plug assist debe ser usado si:

$H/D \geq 0.4$ (ó ≥ 0.35 cuando la forma del producto tiene una inclinación mayor a 10° y un pequeño radio de base < 6 mm).

H = profundidad de la cavidad.

D = Diámetro del producto o el ancho en al caso que el producto tenga forma rectangular.

Existen diferentes materiales para la fabricación del plug, pero se debe tener en cuenta los siguientes requerimientos de material.

- No debe enfriar la lámina caliente de plástico cuando entre en contacto con el plug.
- La fricción que existe entre la lámina y el plug debe ser mínima.
- El material debe resistir las cargas mecánicas a las que es sometido, como son calentamiento, abrasión, presión, etc.
- Debe ser fácil de maquinar.
- El precio, los costos de material y de producción también deben ser tenidos en consideración.

6.8 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-PLUG

En primer lugar tenemos que decir que la transferencia de calor es el área de la ingeniería que estudia los diferentes mecanismos de transferencia de calor.

Definición termodinámica de calor: Es la forma de energía en tránsito, que se manifiesta debido a una diferencia de temperaturas.

6.8.1 Mecanismos de transferencia de calor. Existen tres mecanismos básicos de transferencia de calor, ellos son:

- Conducción
- Convección
- Radiación

Conducción: Se define a la transferencia de calor que ocurrirá a través del medio en el cual existe un gradiente de temperaturas. Puede tomar lugar en sólidos, líquidos y / o gases.

Convección: Se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento como resultado de la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

Radiación: Las superficies emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. A pesar que no exista un medio (vacío) se establecerá un intercambio de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas. Esta característica que tiene la radiación térmica de no necesitar de medio es precisamente la que la distingue de los dos mecanismos anteriores.

Analogía eléctrica para transferencia de calor. Una práctica muy utilizada para la resolución de problemas de transferencia de calor, es la aplicación de la analogía eléctrica, la cual establece una analogía entre las siguientes variables:

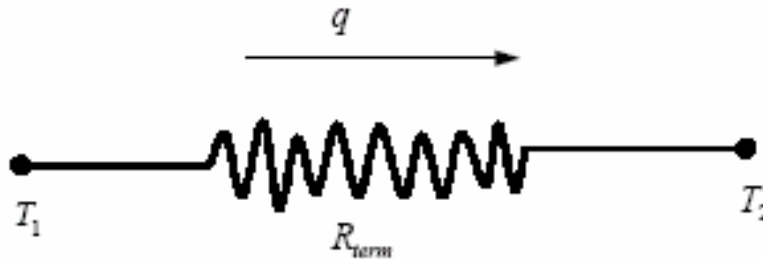
ElectricidadIntensidad, i Voltaje, V

Ley de Ohm,

Transferencia de calorFlujo de calor, q Temperatura, T

En esencia, la analogía eléctrica consiste en identificar la resistencia térmica, $R_{\text{térn}}$

Figura 7. Analogía eléctrica con la transferencia de calor.



Existen ciertos tipos de problemas, principalmente relacionados con intercambiadores de calor, donde es conveniente simplificar el cálculo del calor, esto se realiza incorporando el concepto de coeficiente global de transferencia de calor, U , el cual se relaciona con el calor mediante la siguiente ecuación:

$$q = UA\Delta T_{\text{total}}$$

donde:

U : Coeficiente global de transferencia de calor, $U = [\text{W} / \text{m}^2 \text{K}]$

Con relación a la analogía eléctrica podríamos señalar que el coeficiente Global de transferencia de calor se obtiene al reducir todo el circuito eléctrico análogo, a una sola resistencia total, la cual se relaciona con, U , a través de:

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{UA}$$

Donde U es la constante de proporcionalidad de transferencia de calor entre la lámina y el plug.

6.9 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-CAVIDAD

Constante de proporcionalidad de transferencia de calor entre la lámina y el plug.

6.10 FORMA DEL PLUG

La forma del plug assist, se determina por ensayo y error, donde se parte de una forma básica sugerida la cual se va modificando hasta conseguir que al final del proceso se obtenga el producto con la distribución de espesores deseada.

El contorno de un plug assist depende de los siguientes factores.

- Contorno de la cavidad.
- Lámina que será formada, tipo de material, acabado del material, comportamiento del termoformado.
- Temperatura de formado.
- Material del plug assist.
- Rugosidad superficial del plug assist.
- Secuencia del proceso de formado.

6.11 TIEMPO DE DESCENSO DEL PLUG

El tiempo de descenso del plug, es determinado por la velocidad de acción del dispositivo neumático que acciona el plug assist, que puede ser ajustado dependiendo del tipo de máquina que se esté utilizando en el proceso.

6.12 RECORRIDO DEL PLUG

Es la profundidad hasta la que deberá llegar el plug antes de terminar su recorrido. Esta profundidad se ajusta dependiendo de la cantidad de material que quiera ser arrastrado al fondo del producto, el cual se define de acuerdo a la funcionalidad del producto o a las cargas que éste deba soportar.

6.13 TIEMPO DE DURACIÓN DEL AIRE DE FORMADO

Es el tiempo durante el cual se ejerce presión de aire contra la lámina para despegarla del plug y adherirla a las paredes de la cavidad y dando como resultado que la lámina tome la forma del producto.

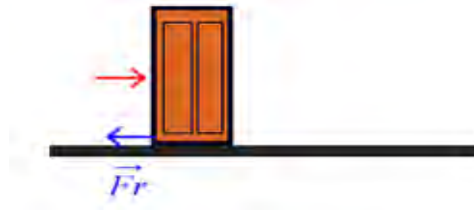
6.14 ALTURA DEL SENSOR

El sensor es un dispositivo ubicado en el camino del plug, el cual marca la entrada del aire de formado una distancia determinada antes que el plug termine el recorrido.

6.15 COEFICIENTE DE FRICCIÓN PLUG-LÁMINA

Se define a la fricción como una fuerza resistente que actúa sobre un cuerpo, que impide o retarda el deslizamiento de este respecto a otro o en la superficie que esté en contacto. Esta fuerza es siempre tangencial a la superficie en los puntos de contacto con el cuerpo, y tiene un sentido tal que se opone al movimiento posible o existente del cuerpo respecto a esos puntos (Figura 8). Por otra parte estas fuerzas de fricción están limitadas en magnitud y no impedirán el movimiento si se aplican fuerzas lo suficientemente grandes.

Figura 8. Fuerza de fricción.



Esta fuerza es la causante, por ejemplo, de que podamos andar (cuesta mucho más andar sobre una superficie con poco rozamiento, hielo, por ejemplo, que por una superficie con rozamiento como, por ejemplo, un suelo rugoso).

La fuerza de rozamiento entre dos cuerpos no depende del tamaño de la superficie de contacto entre los dos cuerpos, pero sí depende de cual sea la naturaleza de esa superficie de contacto, es decir, de que materiales la formen y si es más o menos rugosa.

La magnitud de la fuerza de rozamiento entre dos cuerpos en contacto es proporcional a la normal entre los dos cuerpos, es decir:

$$F_r = m \cdot N$$

Donde m es lo que conocemos como coeficiente de rozamiento.

Existe rozamiento incluso cuando no hay movimiento relativo entre los dos cuerpos que están en contacto. Hablamos entonces de Fuerza de rozamiento estática. Por ejemplo, si queremos empujar un armario muy grande y hacemos una fuerza pequeña, el armario no se moverá. Esto es debido a la fuerza de rozamiento estática que se opone al movimiento. Si aumentamos la fuerza con la que empujamos, llegará un momento en que superemos esta fuerza de rozamiento y será entonces cuando el armario se pueda mover. Una vez que el cuerpo empieza a moverse, hablamos de fuerza de rozamiento dinámica. Esta

fuerza de rozamiento dinámica es menor que la fuerza de rozamiento estática., podemos así establecer que hay dos coeficientes de rozamiento: el estático, m_e , y el cinético, m_c , siendo el primero mayor que el segundo.

El coeficiente de fricción plug-lámina es la constante de proporcionalidad de la fuerza de resistencia que impide el deslizamiento entre el plug y la lámina. Este coeficiente se determina de acuerdo a la norma ASTM D 1894.

La medición de este coeficiente es relativamente complicada debido a que durante el proceso de formado muchos parámetros inciden en el valor de este coeficiente. El coeficiente de fricción depende directamente de la temperatura, lo cual hace que éste fluctúe dentro de distintos rangos de valores. Por ello, lo mas aconsejable es determinar el coeficiente y evaluar los resultados en la simulación.

6.16 COEFICIENTE DE FRICCIÓN CAVIDAD-LÁMINA

El coeficiente de fricción cavidad-lámina es la constante de proporcionalidad de la fuerza de resistencia que impide el deslizamiento entre la cavidad y la lámina. Este coeficiente se determina de acuerdo a la norma ASTM D 1894.

6.17 CAVIDAD

La cavidad es la parte del molde que tendrá la forma del producto base rectangular 500 g., la cual copiará el plástico cuando sea termoformado.

7. FORMA DE MEDIR Y/O CALCULAR LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE TERMOFORMADO

Para el desarrollo de la simulación del proceso de termoformación de la base rectangular 500g. el software debe ser alimentado con la información de los parámetros de proceso y otras variables que debieron ser medidas y/o calculadas.

La obtención de los parámetros de proceso se realizó por medio de un ensayo controlado en la empresa Tecar S.A., en donde se hizo la termoformación de la base rectangular 500 g. bajo las siguientes condiciones para garantizar que la obtención de los datos fuera lo mas verídica posible, y además que la simulación del proceso real garantizara la utilización de los parámetros reales de proceso.

- La extrusión de la lámina se realizó bajo las condiciones de proceso normal que se utilizan para producir lámina para la base rectangular 500 g..
- La lámina se extruyó translúcida (sin colorante) para que permitiese ver en el producto final lugares con posible acumulación de material.
- La termoformación del producto se realizó bajo las condiciones de proceso normales utilizadas para termoformar el producto de línea base rectangular 500 g. y verificando que el producto estuviera conforme con la ficha técnica de calidad para dicho producto (ver Anexo B).
- Durante la termoformación del ensayo se controlaron las especificaciones técnicas más importantes del producto, como lo son el peso, el espesor de pared media y la compresión en caliente. También se realizaron las pruebas de calidad después de termoformado el producto.

- El proceso de termoformación está sujeto a muchas variaciones que afectan el resultado final del producto, y las cuales provocan que el producto final tenga diferencias en sus especificaciones entre uno y otro.
- Los datos de las especificaciones medidas fueron tomados de una muestra de 24 bases, 2 de cada cavidad del molde.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas durante y después del ensayo de termoformación del producto base rectangular 500 g.

Durante el ensayo

- Peso (Gramos)

Promedio	16,26 g
Desviación	0,15
Máximo	16,58 g
Mínimo	16,02 g

- Resistencia a la compresión en caliente (Newton). La resistencia a la compresión se mide cuando el producto aun está caliente, ya que es uno de los requerimientos de calidad, el cual debe ser corregido durante el proceso si no se está cumpliendo con la especificación. Por experiencia se sabe que la resistencia medida a un producto recién termoformado aumenta en alrededor de 20 N cuando el producto termoformado se enfría después de 48 h, ya que las moléculas del polipropileno se reacomodan y aumentan la resistencia del producto. La prueba se hace con el INSTRON (máquina universal para ensayos). En donde el producto se somete a una carga de compresión hasta que llega al punto de falla como se muestra en la figura 9 , el valor mas alto medido es la resistencia a la compresión máxima del producto

Figura 9. Ensayo de compresión.



Promedio	151,36 N
Desviación	13,21
Máximo	168,30 N
Mínimo	121,00 N

- **Espesor de pared media (mm).** El espesor de pared media es medido durante el proceso de termoformación del producto ya que este requerimiento de calidad es el que afecta la resistencia a la compresión y si se encuentra por debajo de la especificación, es muy probable que el producto no pase la prueba de resistencia a la compresión.

Promedio	0,32 mm
Desviación	0,01
Máximo	0,30 mm
Mínimo	0,34 mm

Después de termoformado el ensayo

Después de 48 horas de termoformado el producto se tomó una muestra de 24 bases rectangulares de 500 g. para realizar las pruebas y mediciones de las especificaciones de calidad de calidad

- Resistencia a la compresión en caliente (Newton). La prueba se vuelve a realizar para verificar que el producto cumple con la especificación.

Promedio	172,14 N
Desviación	10,75
Máximo	191,29 N
Mínimo	161,17 N

- Espesores de tarrina. Para asegurar que el producto termoformado estaba dentro de las especificaciones técnicas de calidad, se midieron los espesores de la base rectangular 500 g. de acuerdo a la ficha técnica de control de calidad (ver Anexo B).

	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
Espesor 1	0,473	0,043	0,532	0,415
Espesor 2	0,355	0,014	0,373	0,338
Espesor 3	0,272	0,011	0,286	0,256
Espesor 4	0,536	0,061	0,630	0,464
Espesor 5	0,399	0,038	0,455	0,348
Espesor 6	0,379	0,019	0,407	0,356

- Acumulamiento de material. Uno de los objetivos de la termoformación del producto con una lámina translúcida (sin colorante) era que se pudiera apreciar en que zonas se queda el material acumulado y no se distribuye bien, el cual se comprobó al revisar el producto termoformado en donde se nota claramente un acumulamiento de material en el fondo del producto (Figura 10).

Figura 10. Acumulamiento de material en el producto terminado.



7.1 MATERIA PRIMA

El software cuenta con una librería interna con diferentes tipos de materiales plásticos, los cuales se pueden utilizar en las simulaciones. Para efectos de una simulación mucho más rigurosa, el software permite la creación de un nuevo material, el cual requiere:

- Los datos de los coeficientes del modelo matemático que describe el comportamiento viscoelástico de los polímeros (KBKZ o PTT).
- Los datos de los coeficientes del modelo de dependencia a la temperatura WLF (Propuesto por Williams, Landel y Ferry,).

- Propiedades físicas del material como la densidad, calor específico, conductividad térmica, etc...
- Se deberán tener los datos de esfuerzo-deformación en el tiempo del material.

Para tener toda esta información del material, se deberá realizar la caracterización propia de la materia prima con la que es fabricado el producto. Dicha caracterización, es realizada por laboratorios especializados, donde por medio de la experimentación y basándose en el modelo matemático que describe el comportamiento viscoelástico de los polímeros se obtiene la información requerida por el software.

El laboratorio DatapointLabs ofrece en su portal en Internet el servicio de caracterización de materiales, para una variedad de programas de simulación de procesos y programas para análisis de estructurales.

DatapointLabs tiene sociedades con los vendedores de los principales programas de CAE a nivel mundial, para proporcionar un conveniente acceso a las propiedades representativas para diseño. Cuenta con un personal que está familiarizado con las necesidades de los usuarios para poder proporcionar asistencia técnica acerca del software y poder dar soluciones completas para las preguntas sobre el modelado de materiales.

El producto base rectangular 500 g. se fabrica con una composición de tres materias primas, polipropileno PP 03H83, colorante MASTERBATCH, y un antiestático.

Para el desarrollo de la simulación del proceso de termoformado del producto base rectangular 500 g. se utilizó como material el polipropileno (PP) de la librería del software T-Sim, ya que no se podía realizar la caracterización del material por su alto costo.

7.2 TEMPERATURA DE LÁMINA

La temperatura de la lámina es uno de los parámetros mas importantes del proceso, el cual se controla en la máquina termoformadora por medio de controles independientes que manejan la temperatura de las resistencias por zonas, éstas calientan la lámina, pero no de manera uniforme y no existe un dispositivo instalado en la máquina para saber cual es la temperatura real de toda la lámina. En el proceso real la pericia del operador de la máquina termoformadora es la que determina si la lámina está o no en la temperatura deseada, revisando el producto recién termoformado.

Para obtener un valor aproximado de la temperatura de la lámina, se midió con un termómetro infrarrojo*, con el cual se tomó el valor de la temperatura en diferentes puntos y se promedió para sacar un valor aproximado. El resultado de la medida fue el siguiente:

Promedio	158,05 °C
Desviación	1,70
Máximo	163,80 °C
Mínimo	156,50 °C

7.3 ESPESOR DE LA LÁMINA

El espesor se establece de acuerdo al peso del producto, para este caso la lámina se extruye con un espesor de 1.44 mm de acuerdo a la ficha técnica del producto (Anexo B).

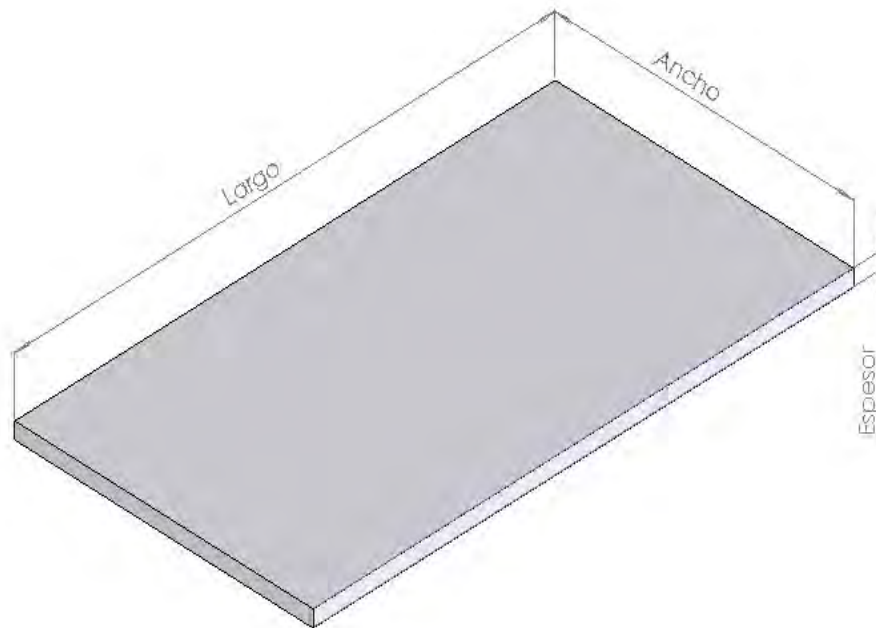
Para un producto nuevo o en desarrollo el espesor de la lámina se puede calcular de esta ecuación:

* Marca PCE modelo MX 2

Densidad del material = Peso deseado del producto / Volumen

Donde el volumen esta dado por el largo de la boca del producto y el ancho de la boca de producto, y el espesor es la variable a despejar.

Figura 11. Dimensiones de la lámina.



7.4 TEMPERATURA DEL MOLDE

La temperatura del molde es medida con un termómetro infrarrojo y se toma dentro de la cavidad. Se realizaron varias medidas, las cuales se promediaron.

Promedio	30,6 °C
Desviación	3,36
Máximo	35,7°C
Mínimo	28,0°C

7.5 TEMPERATURA DEL PLUG

Con el termómetro infrarrojo se toma la medida de la temperatura del plug después de una (1) hora de comenzado el ensayo para que el plug alcance una temperatura estable, ya que el plug al comenzar el proceso arranca con una temperatura ambiente pero comienza a robarle el calor a la lámina y a elevar su propia temperatura. Se realizaron 5 mediciones de la temperatura sobre la superficie del plug con el termómetro infrarrojo

Promedio	40,16 °C
Desviación	0,97
Máximo	42,30 °C
Mínimo	37,90 °C

7.6 PRESIÓN DEL AIRE DE FORMADO

La presión del aire de formado es la necesaria para que la lámina se despegue de las áreas de contacto con el plug y la pegue contra las paredes de la cavidad tomando la forma de la cavidad. Para poder realizar esta tarea el aire deberá entrar con una presión suficiente, que viene dada por el compresor con el que es alimentada la máquina.

Durante la realización de la termoformación del ensayo se registró una presión en los manómetros de la máquina de 800 Kpa.

7.7 MATERIAL DEL PLUG

El plug con el que es termoformada la base rectangular 500 g. está fabricado en un material sintético, llamado Hytac B1X (Anexo C).

El Hytac B1X es el primer material para la fabricación de plugs, que combina la resistencia de los materiales de ingeniería termoplásticos con la baja conductividad térmica de una espuma sintética (syntactic foam). Plug asist hechos de Hytac B1X resistirán toda suciedad y golpes asociados con el abuso en la producción, mientras reduce las huellas y dificultades de deslizamiento propias de procesar polímeros. Hytac B1X mantiene una alta estabilidad termal requerida hoy en día para procesar polímeros por termoformación. Además, Hytac B1X elimina las dificultades de maquinar las convencionales espumas sintéticas (syntactic foams). Este producto no produce polvo durante el maquinado o pulido de los plugs.

7.8 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-PLUG

La constante de proporcionalidad h de transferencia de calor entre la lámina y el plug se calcula así:

$$Q_{\text{plug}} = \frac{K * A * \Delta T}{L}$$

Q_{plug} = Calor Ganado por el plug.

$K = 0,22 \text{ w/m}^\circ\text{k}$ (Anexo C)

$A = \text{Área superficial del plug} = 0,0290 \text{ m}^2$

$\Delta T = \text{Diferencia de temperaturas entre la superficie y el centro del plug.}$

$\Delta T = \text{Temp. Superficie del plug} - \text{Temp. centro del plug}$

$\Delta T = 40,16^\circ\text{C} - 26,7^\circ\text{C} = 13,46^\circ\text{C} = 286,61^\circ\text{k}$

$L = \text{Longitud desde la superficie al centro del plug} = 0,0326 \text{ m}$

$Q_{\text{plug}} = 56,09 \text{ w}$

$Q_{\text{plug}} = h_{\text{plug}} * A * \Delta T$

$$h_{\text{plug}} = \frac{Q_{\text{plug}}}{A * \Delta T} = \mathbf{6,74 \text{ w/m}^2\text{°k}}$$

7.9 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-CAVIDAD

La constante de proporcionalidad h de transferencia de calor entre la lámina y la cavidad se calcula así:

$$Q_{\text{lámina}} = Q_{\text{inserto}} + Q_{\text{plug}} + Q_{\text{aire}}$$

Q_{plug} = Calor Ganado por el plug.

Q_{inserto} = Calor Ganado por el inserto.

Q_{aire} = Calor Ganado por el aire.

Para simplificar los cálculos asumiremos $Q_{\text{aire}} = 0$.

$$Q_{\text{lámina}} = \frac{\Delta h * m}{\text{t ciclo}}$$

$$\Delta h = h_{\text{lámina}} - h_{\text{producto}}$$

$$h_{\text{lámina}} = h_{\text{pp@158}^{\circ}\text{C}} = 94,84 \text{ Kcal/Kg}$$

$$h_{\text{producto}} = h_{\text{pp@60}^{\circ}\text{C}} = 28,5 \text{ Kcal/Kg}$$

$$m = 16,5 \text{ g.} = 0,0165 \text{ Kg.}$$

$$T_{\text{ciclo}}^* = 0,674 \text{ s.}$$

$$Q_{\text{lámina}} = \frac{(94,84 - 28,5) \text{ Kcal / Kg} * 0,0165 \text{ Kg}}{0,674 \text{ s}} = 1,624 \text{ Kcal/s} = 6797,252 \text{ w}$$

$$Q_{\text{inserto}} = Q_{\text{lámina}} - Q_{\text{plug}}$$

$$Q_{\text{inserto}} = 6797,252 \text{ w} - 56,09 \text{ w}$$

$$Q_{\text{inserto}} = 6741,162 \text{ w}$$

* Tiempo que transcurre desde el inicio del descenso del plug hasta la expulsión del producto formado.

$$Q_{\text{inserto}} = h_{\text{inserto}} * A * \Delta T$$

$$A = \text{Área superficial de la cavidad} = 0,037 \text{ m}^2$$

ΔT = Diferencia de temperaturas entre la temperatura del agua de salida y la temperatura de la superficie del inserto.

$$\Delta T = 105^{\circ}\text{C} - 30,6^{\circ}\text{C} = 74,4^{\circ}\text{C} = 347,55^{\circ}\text{K}$$

$$h_{\text{inserto}} = \frac{Q_{\text{inserto}}}{A * \Delta T} = \mathbf{524,2 \text{ w/m}^2\text{°K}}$$

7.10 FORMA DEL PLUG

Aunque la forma del plug para este caso ya está establecida (Figura 12) y es con la cual se trabajará la simulación, hay ciertos parámetros a la hora de diseñar un plug y de determinar su contorno para un producto nuevo.

Figura 12. Forma del plug.



Procedimiento general

I. El contorno inicial resulta de la forma de la cavidad, del cual se asume un espacio “a” provisionalmente a todas la paredes de la cavidad y en la base,

$$\text{Donde } a = 1.5 * s_1 + x$$

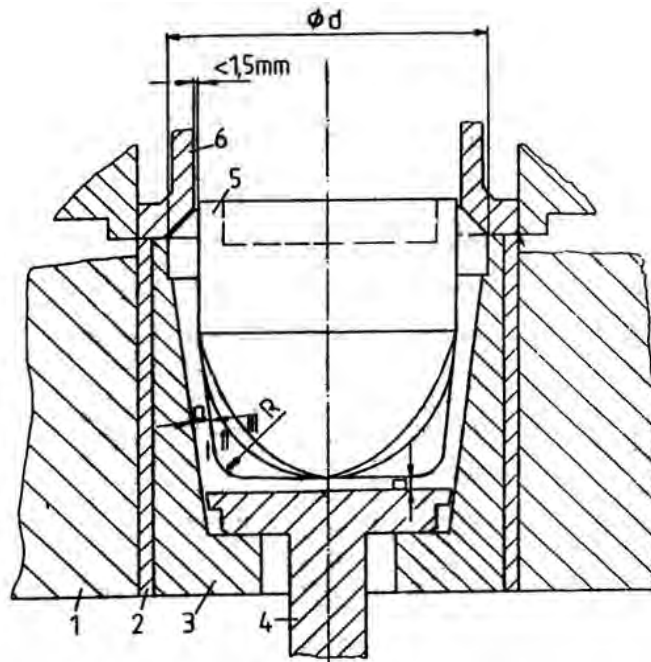
s_1 = espesor inicial de la lámina en mm.

$x = 1$ a 3 = constante en función del espesor de la lámina, 1 para espesor < 1 mm.

d = diámetro del producto en mm. Si el producto es rectangular se debe usar el ancho.

II. En máquinas termoformadoras como la RDM* donde se fabrica la base rectangular 500 g., el sujetador de la lámina presenta lados con interferencia los cuales deben ser tenidos en cuenta, donde se debe dejar un espacio de 1.5 mm entre el pisador y el plug (Figura 13).

Figura 13. Forma del plug.



1. Chaqueta de enfriamiento, 2. Cuchilla de corte, 3. Segmento de la cavidad, 4. Expulsor, 5. Plug assist, 6. Pisador

III. Al principio el radio o el contorno de la base es tomado de la tabla 3. El radio de la base se debe aumentar en los siguientes casos:

* Referencia de máquina fabricada por la empresa Illig.

- La resistencia de la lámina es baja a temperatura de formado.
- La tempera de formado es alta.
- La fricción entre el plug y la lámina es alta.

d = Diámetro del producto terminado

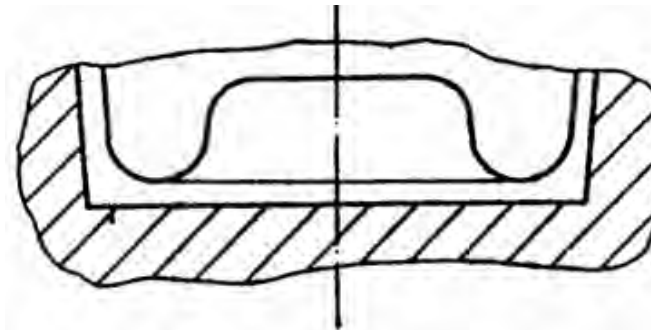
s = Espesor inicial del producto semiterminado

Tabla 3. Radio del plug assist para láminas con baja resistencia a la fricción.

d (mm)		S (mm)	<1	2	3
	10		1	1	1
	20		1	2	2,5
	30		1,5	2,5	3
	40		2	3	4
	50		2,5	4	4
	60		3	4	5
	70		3,5	5	5
	80		4	5	5
	90		4,5	5	5
	100		5	5	5

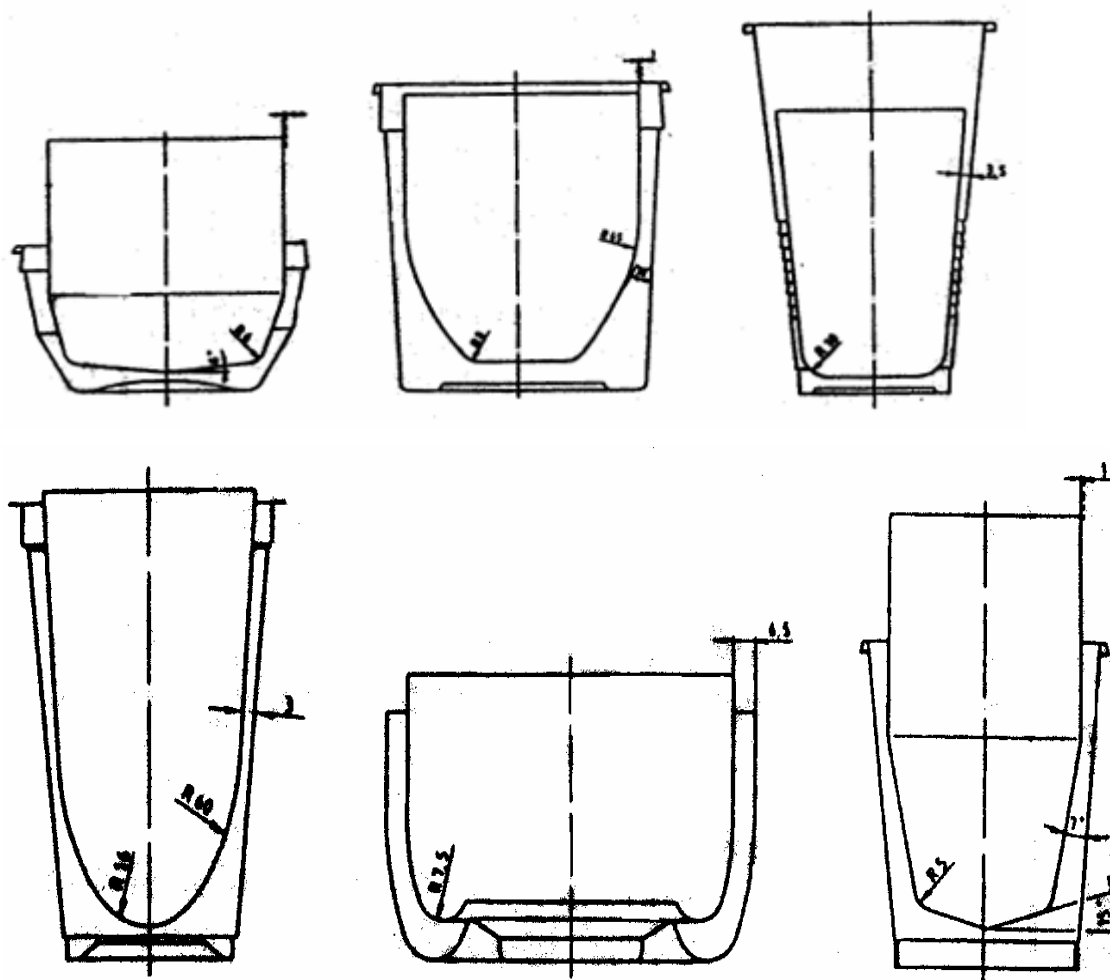
Si la base del plug assist tiene una superficie plana relativamente grande, ésta puede llevar un ahondamiento en la misma (Figura 14) que disminuirá las áreas de contacto entre el plug y la lámina, pero si el ahondamiento es relativamente pequeño la lámina copiará dicha forma.

Figura 14. Ahondamiento en el plug.



El radio R puede ser tomado de la tabla 3. Los valores son correctos para materiales con tendencia de adhesión pequeña; para materiales suaves que se funden fácilmente los valores de R son multiplicados por un factor que está entre 1.5 y 3.

Figura15. Ejemplos de formas de plugs vs. Formas de envases.



7.11 TIEMPO DE DESCENSO DEL PLUG

Para la medición del tiempo de descenso del plug fue necesario crear un dispositivo electrónico con el cual se pudiera leer el tiempo desde que el plug

comienza su descenso hasta que termina su recorrido. El dispositivo cuenta con dos sensores de posición ópticos ubicados en el mecanismo neumático que acciona el plug y los cuales detectan el inicio y el final de la carrera del plug. Por medio de un display se visualiza el tiempo que tardó el plug en completar su recorrido (Figura 16).

Figura 16. Foto del sensor.



Se tomaron 18 datos de tiempo del sensor los cuales fueron promediados y el resultado fue el siguiente:

Promedio	101,2 ms
Desviación	1,89
Máximo	99,00 ms
Mínimo	102,60 ms

7.12 RECORRIDO DEL PLUG

El recorrido del plug depende directamente de la profundidad del producto; para productos nuevos éste se calcula por medio de una fórmula; para la base rectangular 500 g. el recorrido ya está establecido, y es de 46 mm, los cuales fueron ajustados y medidos en el cuadro de la máquina para la termoformación del ensayo.

Fórmula para calcular el recorrido del plug:

Recorrido del plug $A = B + C - (4... 5 \text{ mm})$

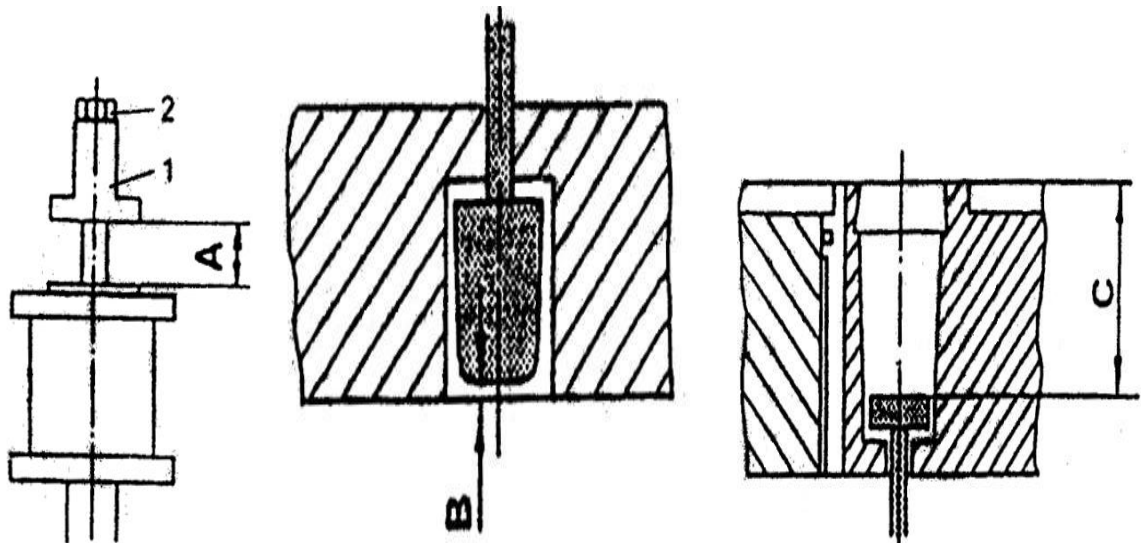
Donde A, B C son:

A: Recorrido del dispositivo neumático que acciona el plug.

B: Distancia entre la placa superior del molde y el plug.

C: Distancia desde la placa inferior del molde hasta el expulsor.

Figura 17. Recorrido del plug.

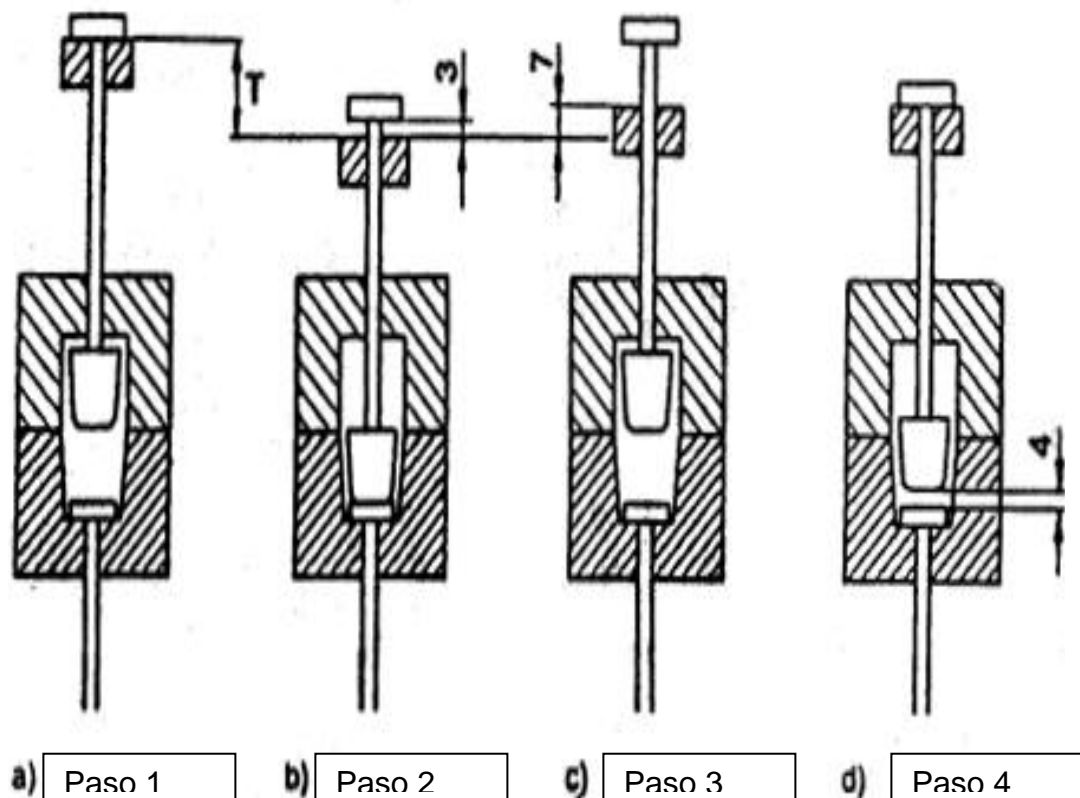


1. Ajuste de parada., 2. Tuerca de ajuste.

La profundidad calculada se prueba ya en proceso, en donde se determina si el producto termofomado tiene la forma y la distribución de espesores requerida; de lo contrario se tendrá que jugar con dicho valor hasta alcanzar la distribución de espesores deseada en el producto final.

Otra forma de poder encontrar el valor de la profundidad del recorrido del plug assist es ajustando el tope de la barra del pistón por medio de la tuerca de parada a 4 mm del fondo del producto como lo muestra la figura 18. Se comienza con el proceso de termoformación del producto variando el valor de la profundidad del plug en proceso hasta lograr alcanzar la distribución de espesores deseada en el producto final.

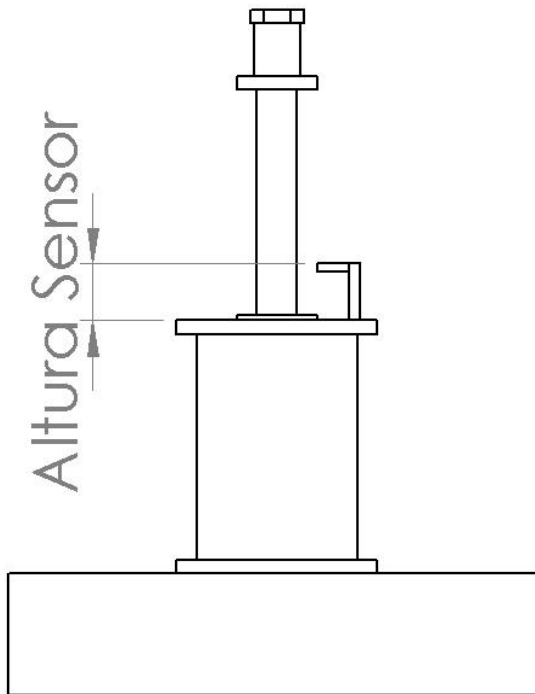
Figura 18. Ajuste de recorrido del plug.



7.13 TIEMPO DE DURACIÓN DEL AIRE DE FORMADO

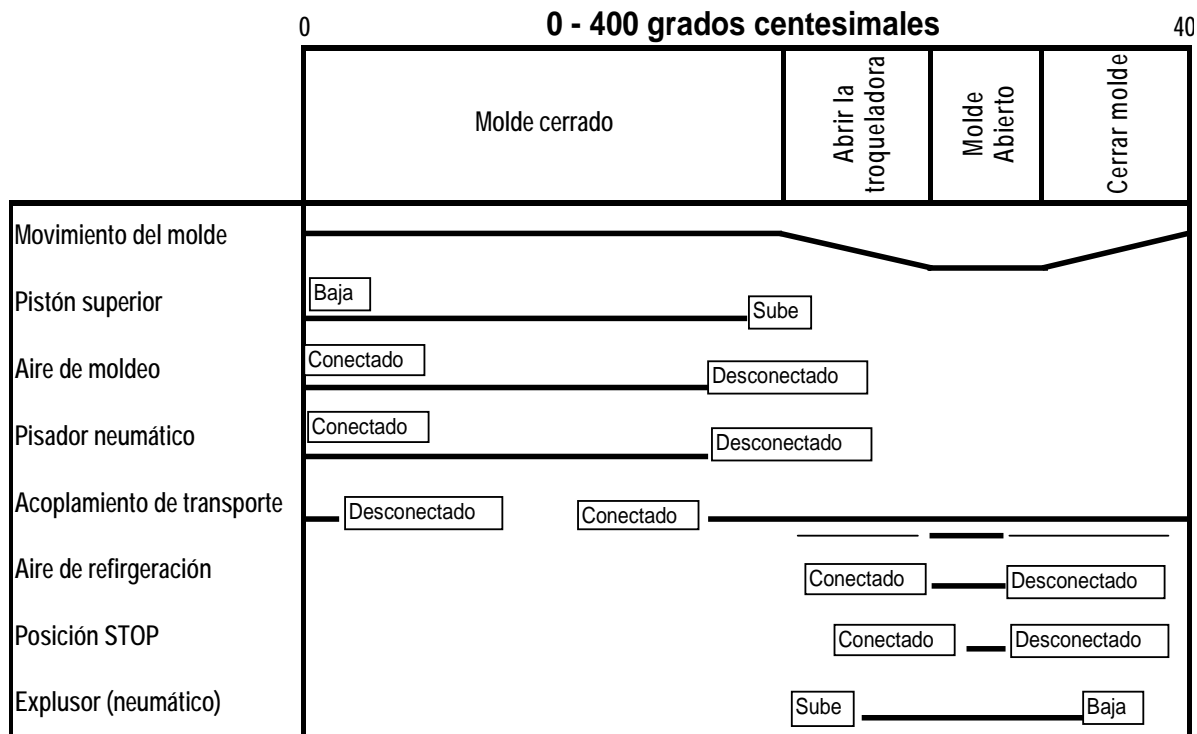
El dispositivo de accionamiento neumático del plug tiene en su carrera un sensor como se muestra en la figura 19 que activa la entrada del aire de formado un determinado tiempo antes de que el plug termine su recorrido. La válvula del aire de formado se cierra automáticamente cuando el producto se encuentra formado y enfriado. Este tiempo es establecido cuando el producto está en desarrollo, donde se prueba el tiempo necesario para que el producto quede bien formado y con una temperatura no muy alta que impida que éste sufra deformaciones.

Figura 19. Altura del sensor.



El tiempo de duración del aire de formado es ajustado en el cuadro de la máquina termoformadora, la cual opera con un ciclo de tiempo dividido en grados centesimales, que van desde 0 hasta 400, en donde por cada ciclo se realizan todas las operaciones de la máquina para sacar el producto termoformado como se muestra en el la tabla 4.

Tabla 4. Diagrama del ciclo.



Durante la realización del ensayo se registraron de la máquina termoformadora los valores en donde entra y sale el aire de formado, el número de ciclos por minuto a los que trabajó la máquina y la altura del sensor. Con estos datos se saca el tiempo de duración del aire de formado requerido para alimentar los parámetros del software, el cual se calcula así:

Velocidad de la máquina (Ciclos por minuto)	15,2
1 ciclo (Grados)	400
Grados por minuto	6080
Grados por milisegundo	0,101

Altura del sensor	6 mm
Altura de los machos	46 mm

Datos de máquina				
Operación	Entrada	Salida	Grados	Tiempo ms
Aire de formado	380	108	128	1066
Plug	380	50	70	493

Datos del desplazamiento del plug			
	Recorrido total	Recorrido plug en la cavidad	Donde entra el aire
Distancia mm	46	46	40
Tiempo ms	101,19	101,19	88,00
Velocidad mm/ms	0,455		

El tiempo de acción del aire de formado = $(1066 - 493) + (101.19 - 88) = 586\text{ms}$

7.14 ALTURA DEL SENSOR

La altura del sensor se determina de acuerdo a la cantidad de material que se desee arrastrar al fondo del producto, entre mayor sea la altura del sensor menos material será arrastrado al fondo ya que el aire de formado entrará mas tempranamente y distribuirá el material antes que el plug lo arrastre. Por el contrario, si la altura del sensor es menor, el plug terminará su carrera y más material será llevado al fondo del producto.

Este valor se determina por ensayo y error buscando una distribución más o menos uniforme en las paredes y en el fondo del producto. Para la base rectangular 500 g. se determinó una altura de sensor de 6 mm

7.15 COEFICIENTE DE FRICCIÓN PLUG-LÁMINA

Este coeficiente se determina mediante la Norma ASTM D 1894 (Anexo D).

Hay que tener en cuenta que para medir el coeficiente de fricción entre lámina y el plug, la lámina debe estar por el lado opaco de ella, es decir, el lado que tiene contacto directo con el plug.

El ensayo se trabajó a una velocidad de 150 mm/min., con una fuerza normal de 200 g. y a temperatura ambiente. La temperatura de la lámina es la temperatura ambiente. Los datos obtenidos en el ensayo fueron:

Muestra N°	A _k (g.)
1	160.2
2	163.0
3	158.6
4	159.6
5	158.6

A_k promedio: 160 g.

Coeficiente de fricción cinético Plug-Lámina: $\mu_k = \frac{A_k}{200g} = 0.8$

Este valor de coeficiente de fricción varía a medida que la lámina incrementa su temperatura.

7.16 COEFICIENTE DE FRICCIÓN CAVIDAD-LÁMINA

Este coeficiente se determina mediante la Norma ASTM D 1894 (Anexo D).

Hay que tener en cuenta que para medir el coeficiente de fricción entre lámina y la cavidad, la lámina debe estar por el lado brillante de ella, es decir, el lado que tiene contacto directo con la lámina.

El ensayo se trabajó a una velocidad de 150 mm/min., con una fuerza normal de 200 g. y a temperatura ambiente. Los datos obtenidos en el ensayo fueron:

Muestra N°	A _k (g.)
1	98.2
2	99.9
3	100.5
4	101.0
5	100.4

A_k promedio: 100 g.

Coeficiente de fricción cinético Cavity-Lámina: $\mu_k = \frac{A_k}{200g} = 0,5$

7.17 CAVIDAD DEL MOLDE

El diseño de la cavidad se obtuvo de los planos técnicos del producto (Anexo A) en donde se consideró una contracción del producto final del 2%, utilizada para productos termoformados en polipropileno.

Figura 20. Cavidad del molde.



8. SIMULACION DEL PROCESO REAL

Para poder encontrar la influencia de los parámetros del proceso de termoformación, se realizará la simulación del proceso real con los datos recogidos en las mediciones en el ensayo de termoformación y con los datos que fueron calculados anteriormente.

8.2 DEFINICIÓN DE LA LÁMINA

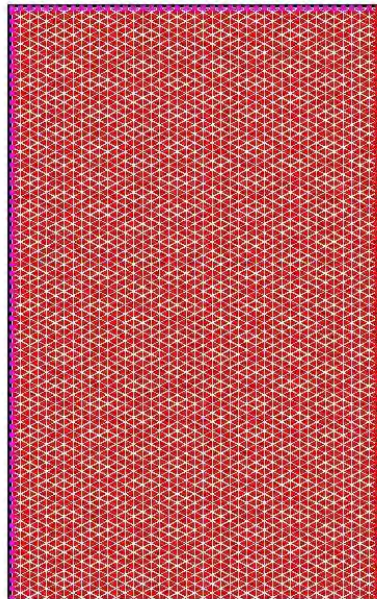
Por efectos de simplicidad y simetría del producto solo se va a trabajar con $\frac{1}{4}$ de lámina, ya que los resultados son iguales a si se simulara con la lámina completa..

Espesor de la lámina: 1.44 mm

Ancho de la lámina: 40.81 mm

Largo de la lámina 65.96 mm

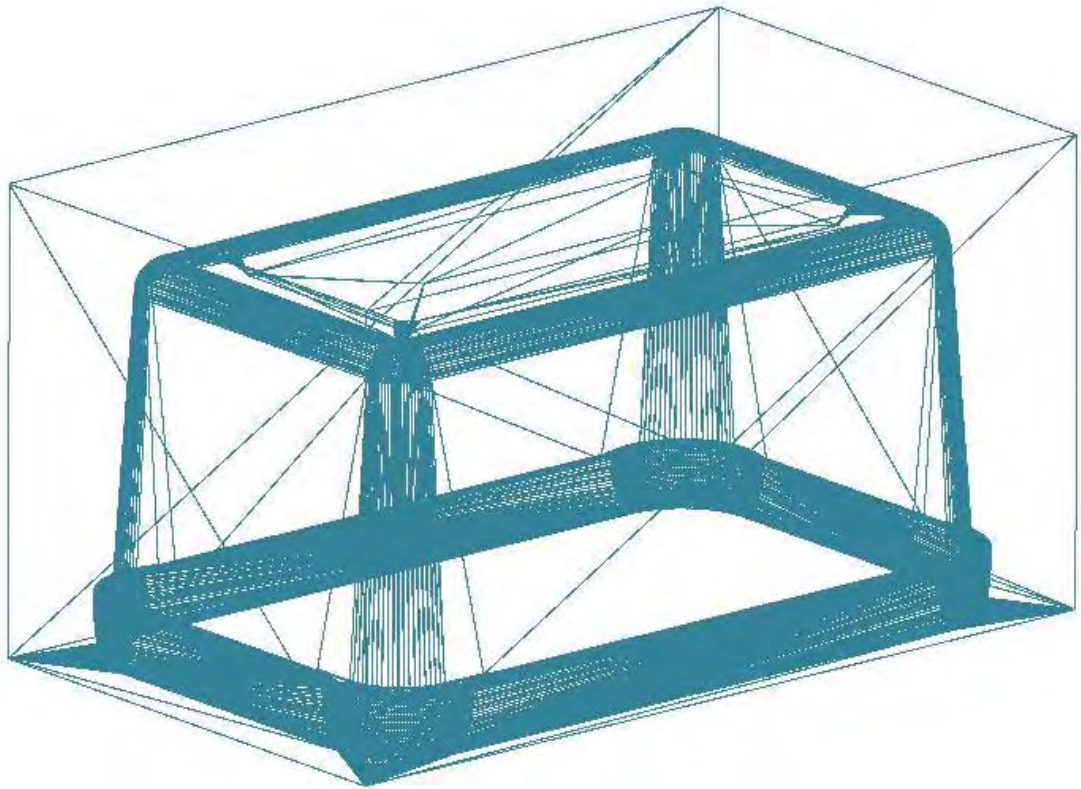
Figura 21. Lámina.



8.3 CREACIÓN DE LA CAVIDAD

El diseño de la cavidad se realiza en un software de CAD paramétrico como el SOLID WORKS, según el plano técnico del diseño del producto (Anexo A), el cual genera un archivo tipo neutro de extensión .STL el cual puede ser importado desde el software para simulación del proceso de termoformación T-SIM. Este procedimiento se explica en el manual de simulación de procesos de termoformado con T-SIM*.

Figura 22. Vista de la cavidad en T-SIM.



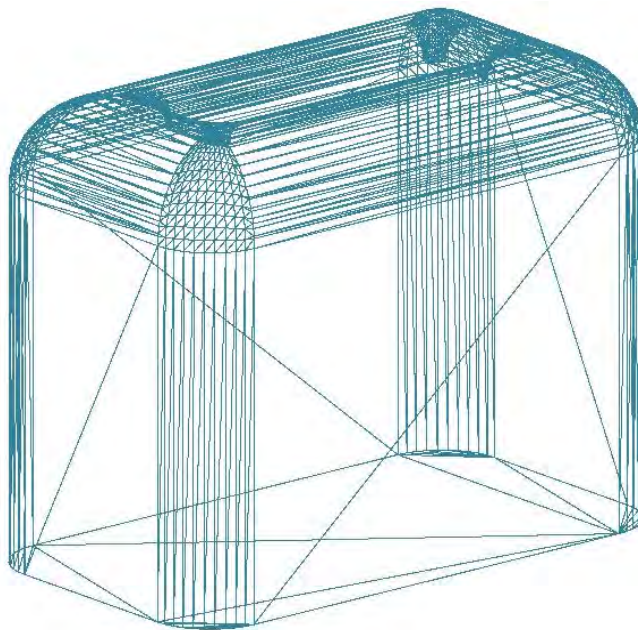
* OTERO, Juan Carlos. Simulación de procesos de termoformado con T-SIM. Cali: Universidad Autónoma Occidente, 2004. p. 71.

Para la simulación de la base rectangular 500 g. se debe quitar la pestaña de la tarrina ya que esta parte del producto se forma por compresión en el molde y no hace parte de la simulación, por eso en el diseño de la cavidad se debe tener en cuenta esta parte de producto para diseñar la pestaña de la base en la cavidad.

8.4 CREACIÓN DEL PLUG

De igual forma el plug se diseño en SOLID WORKS, copiando la forma del plug utilizado en producción normal para termoformar la base rectangular 500 g. El diseño del plug también puede ser importado desde el T-SIM como un archivo neutro con extensión .STL.

Figura 23. Vista del plug en T-SIM.



8.5 CONTROL DE PROCESO

Mediante el control de proceso describimos la secuencia de los diferentes eventos que suceden en el proceso de termoformación, que son el desplazamiento del

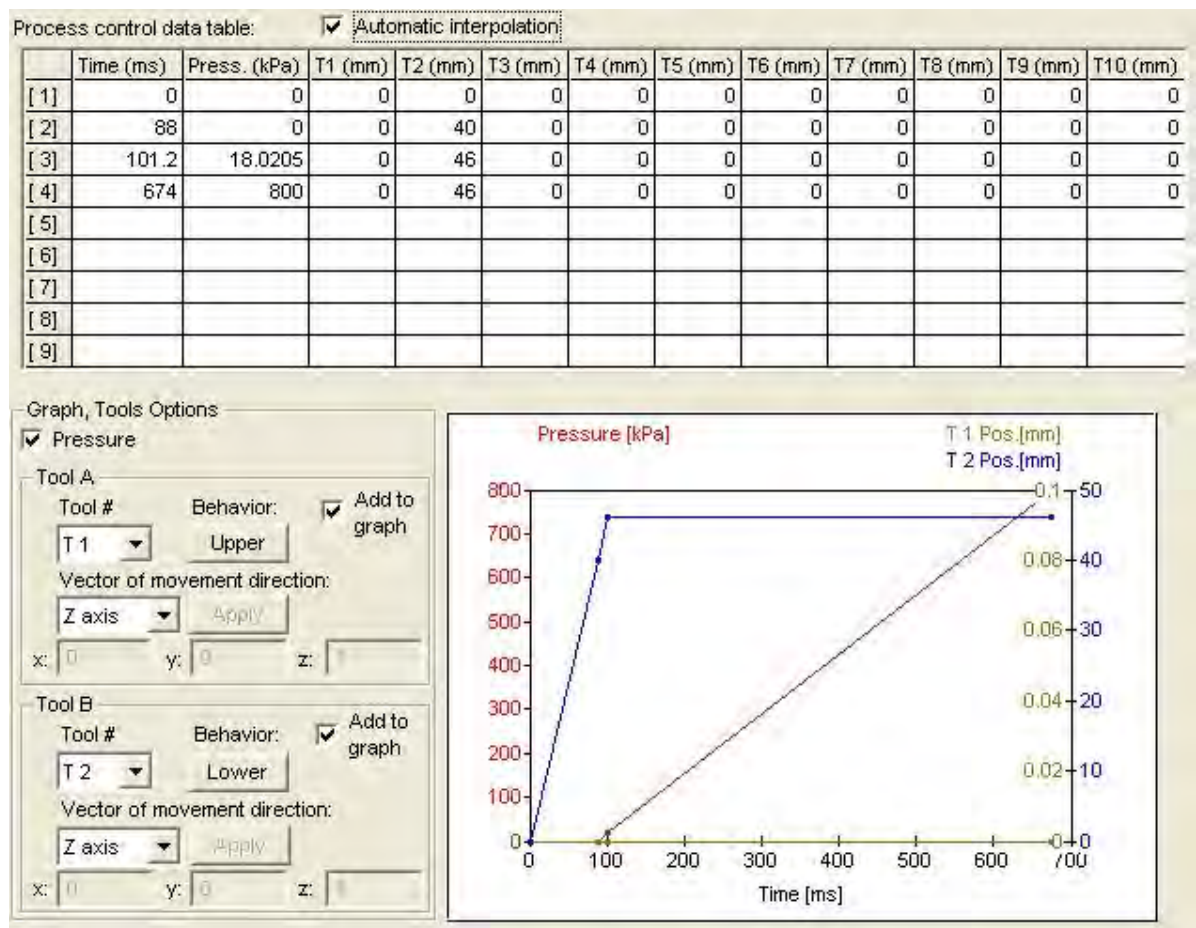
plug con respecto al tiempo y la entrada del aire de formado con respecto al tiempo.

La cavidad es fija en el molde, es decir, no tiene desplazamiento.

El descenso del plug arranca en una distancia 0 y un tiempo 0 hasta una distancia de 46 mm. en un tiempo de 101.2 ms..

El aire de formado entra 6 mm antes que el plug complete su recorrido con una presión de 0 KPa. y va aumentando hasta que alcanza su presión máxima en un tiempo de 674 ms.. Todos estos parámetros se definen en el cuadro de control de proceso del software T-SIM, como se muestra en la figura 24.

Figura 24. Cuadro de control de proceso.

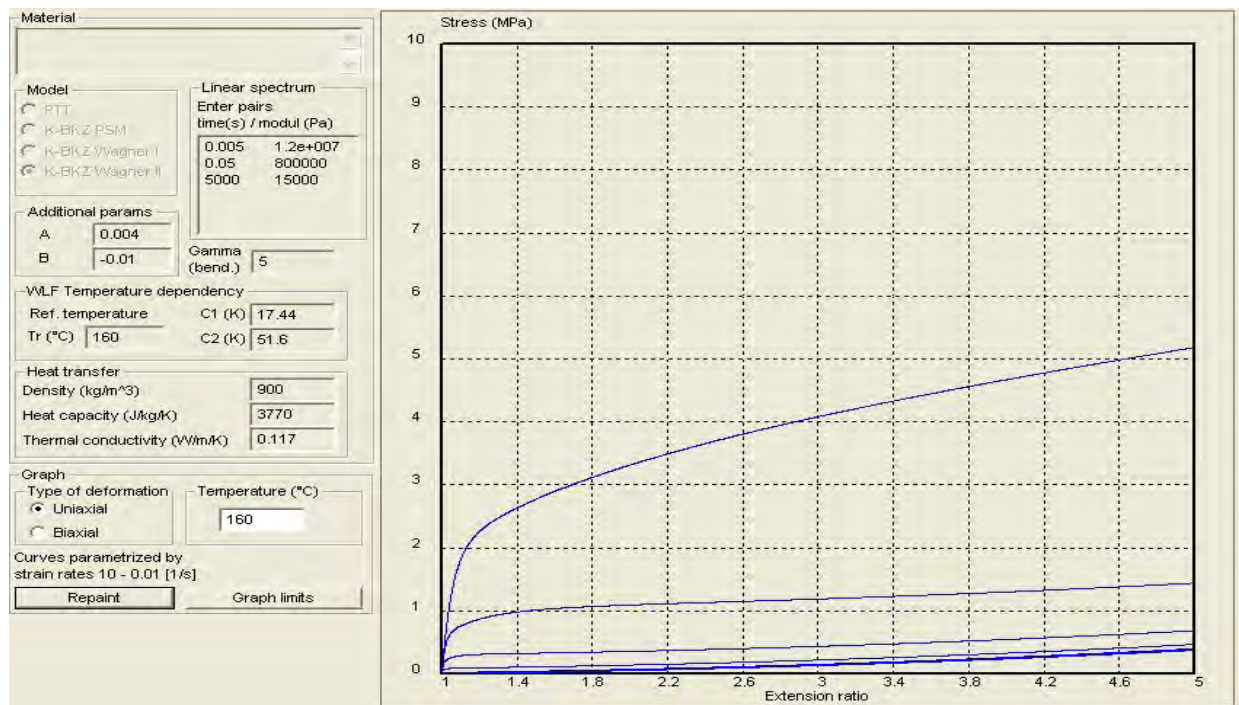


8.6 MATERIAL DE PROCESO

Como se explicó anteriormente, la caracterización del material propio con el que es termoformado el producto base rectangular 500 g. es muy complejo y costoso, y se debe realizar por laboratorios especializados.

Para efectos de esta simulación se trabajó con el material polipropileno de la base de datos del software para simulación de termoformación T-SIM

Figura 25. Material.



8.7 PARÁMETROS DE FRICCIÓN Y TEMPERATURA

En este ítem se definen las características de fricción y temperatura del plug y de la cavidad, las cuales fueron calculadas en el capítulo 7.

Figura 26. Cuadro de control de parámetros de fricción y temperaturas.

The figure displays two screenshots of a software interface titled "Heat and Friction 1". The interface is divided into two main sections, each for a different tool.

Top Screenshot (Tool 1):

- Tools:**
 - Tool selection: Tool # (dropdown menu showing "T 1")
 - Temperatures (C): Tool 1 temperature (input field: 30)
 - Heat transfer coefficients (W/m²K): Tool 1 / Material (input field: 524.2)
 - Friction coefficient: Tool 1 / Material (input field: 0.5)
 - Apply changes in tool data (button)
- Ambient Air:**
 - Ambient Air Temperature (input field: 35)
 - Ambient Air / Material Heat transfer coefficient (input field: 5.7)

Bottom Screenshot (Tool 2):

- Tools:**
 - Tool selection: Tool # (dropdown menu showing "T 2")
 - Temperatures (C): Tool 2 temperature (input field: 40)
 - Heat transfer coefficients (W/m²K): Tool 2 / Material (input field: 6.74)
 - Friction coefficient: Tool 2 / Material (input field: 0.8)
 - Apply changes in tool data (button)
- Ambient Air:**
 - Ambient Air Temperature (input field: 35)
 - Ambient Air / Material Heat transfer coefficient (input field: 5.7)

8.8 PROYECTO

En el proyecto se definen todos los archivos anteriormente descritos con los cuales se va a realizar la simulación, es decir, se definen que lámina se va a utilizar, que control de proceso es el que va a controlar la simulación, cuál es el material de la simulación, cuáles son las herramientas utilizadas, etc..

Después de definidos los archivos requeridos para la simulación, se procede a resolver la simulación.

Figura 27. Proyecto.

The screenshot shows the 'Project files' section of the T-SIM software interface. It includes a 'Grid (sheet)' field with 'Browse' and 'View / Edit' buttons. Below this is a 'Tools' section with a table for 'Tool #' and 'Used'. The first row shows 'T 1' and 'NONE', with 'Browse' and 'View / Edit' buttons. Further down are fields for 'Process control:', 'Material:', and 'Heat & friction:', each with a 'Browse' button and a 'View / Edit' button. A 'Change project files folder' button is located at the bottom right of this section. The 'Solver' section on the left has checkboxes for 'Time step (ms):' (set to 25) and 'Space tolerance (mm):' (set to 0). The 'Additional information' section on the right includes fields for 'Job number:', '#:', 'Programmer:', and a 'Comments:' text area.

Tool #	Used
T 1	NONE

8.9 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO REAL.

El software T-SIM ofrece una amplia variedad de resultados, con los cuales se pueden analizar los productos simulados desde diferentes áreas del conocimiento. Para efecto de este trabajo se manejarán los siguientes resultados:

- Áreas críticas de venteo. Donde se puede ver en que partes o áreas del producto éste no está adherido a las paredes de la cavidad.
- Distribución de espesores. Donde se analiza que partes del producto se encuentran posiblemente débiles de pared o se encuentra un acumulamiento de material.
- Esfuerzos residuales. Bajo este resultado se podrán conocer cuales son las zonas en las que los productos presentan una concentración de esfuerzos

residuales y por las cuales el producto puede llegar a fallar en caso de ser sometidas a algún tipo de carga.

Con esos tres resultados se tratará de comparar un resultado de simulación real con otras simulaciones en las cuales se variarán datos de proceso y se definirá o encontrará su posible influencia.

Áreas críticas de venteo. El análisis de las áreas críticas de venteo muestra bajo un esquema de colores que partes del producto no adhirieron a la cavidad del producto. La escala de colores es la siguiente:

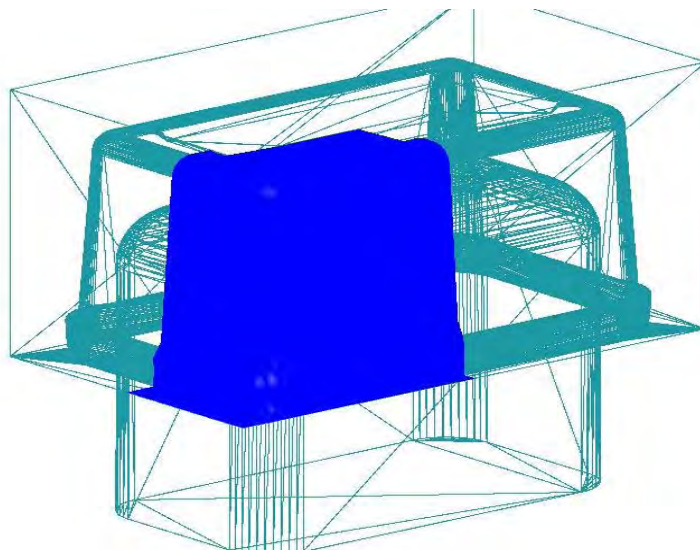
Azul = Área que se encuentra en contacto íntimo con la pared de la cavidad.

Amarillo = Área que apenas se encuentra en contacto con la pared de la cavidad.

Rojo = Área que no se encuentra en contacto con la pared de la cavidad.

El resultado de la simulación del proceso real muestra como la lámina se encuentra totalmente adherida a las paredes de la cavidad como se muestra en la figura 28.

Figura 28. Áreas críticas de venteo en la simulación normal.



Análisis de esfuerzos residuales. El software ofrece un análisis de esfuerzos residuales donde se pueden apreciar y cuantificar en MPa las zonas en las que se encuentran acumulaciones de esfuerzos residuales resultantes del proceso de termoformación. Estos análisis pueden ser exportados a un software CAE para análisis estructurales como el ALGOR, ANSYS, COSMOS etc... donde dicha información podría ser utilizada para encontrar el punto de falla en un producto que será sometido a cargas de compresión, cargas de tensión etc. y así poder mejorar su diseño.

En este caso de estudio los análisis de esfuerzos residuales servirán para encontrar que variables o parámetros de proceso pueden influir en la generación o en la disminución de dichos esfuerzos.

Como resultado de la simulación del proceso real se encontró que el producto presenta una acumulación de esfuerzos residuales (figura 30) en la zona media del producto, lugar por donde normalmente se presenta la falla (ver capítulo 7) cuando es sometido a una carga de compresión para la evaluación de resistencia a la compresión requerida por las especificaciones de calidad de la simulación con el software T-SIM (figura 29).

Figura 29. Área de falla de la tarrina.

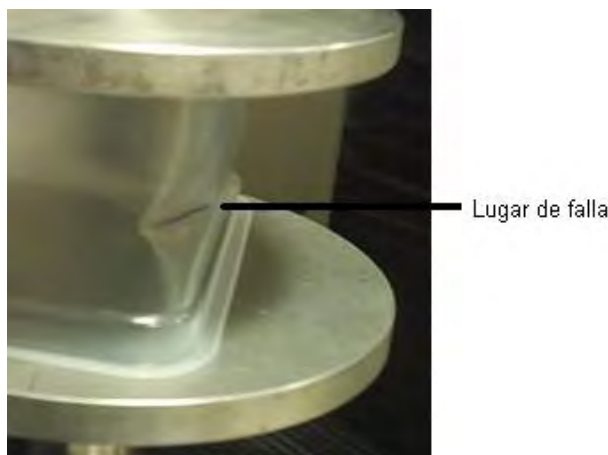
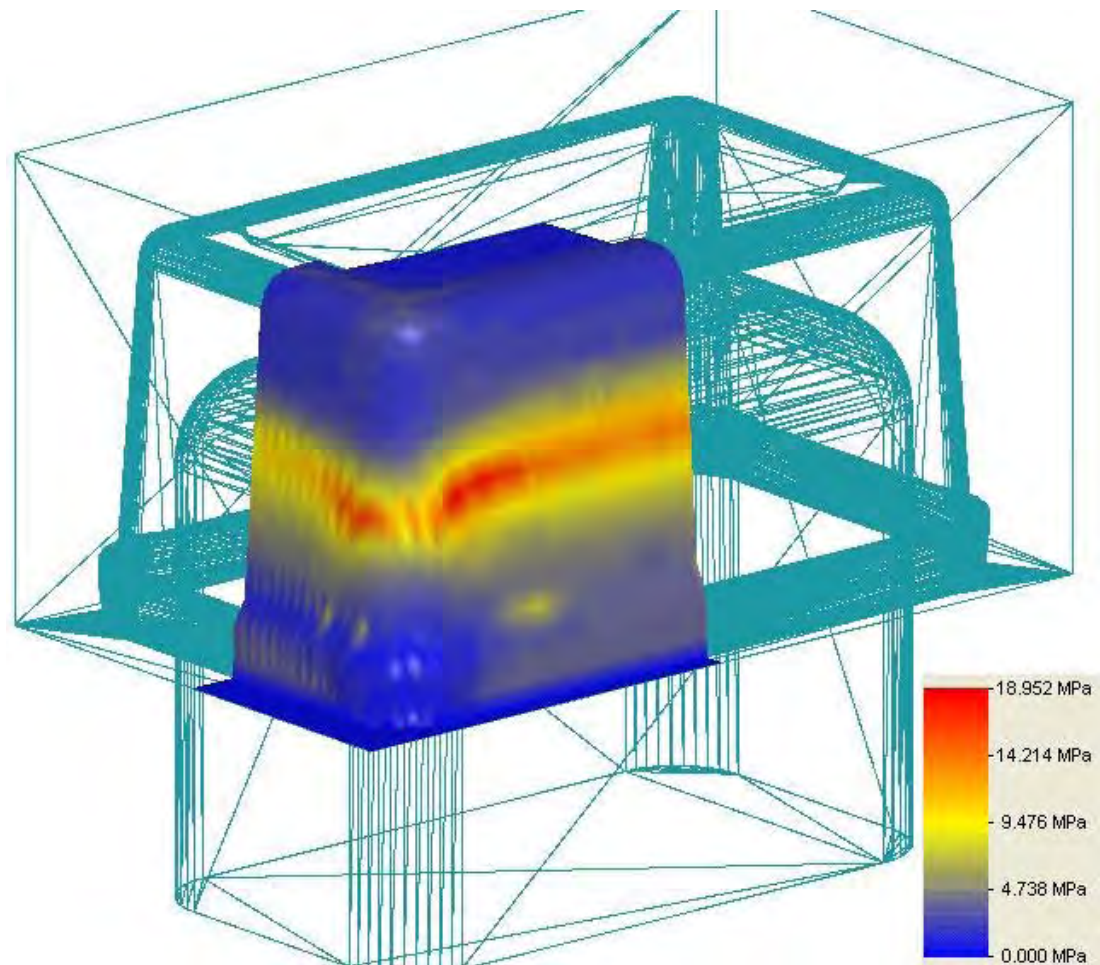
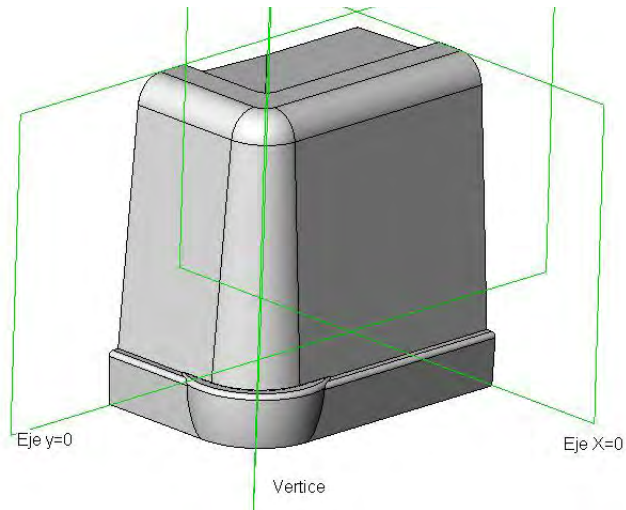


Figura 30. Esfuerzos residuales en la simulación normal.



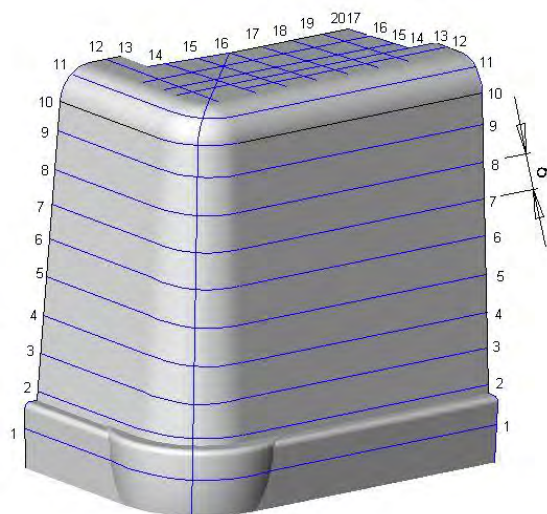
Distribución de espesores. La distribución de espesores que arroja el software T-SIM como resultado de la simulación del proceso de termoformación, detalla todo el perfil de espesores del producto a través de cortes en los 3 ejes o en un corte definido por el usuario con 3 puntos por donde el software realiza el trazo y muestra el resultado de la distribución de espesores correspondiente. Para efectos del análisis de los resultados de la simulación solo se trabajará con el corte por el eje $X = 0$; $Y = 0$ y un corte definido por tres puntos que atraviesa la base rectangular 500 g. por el vértice como se ve en la figura 31.

Figura 31. Ejes de corte para análisis de espesores.



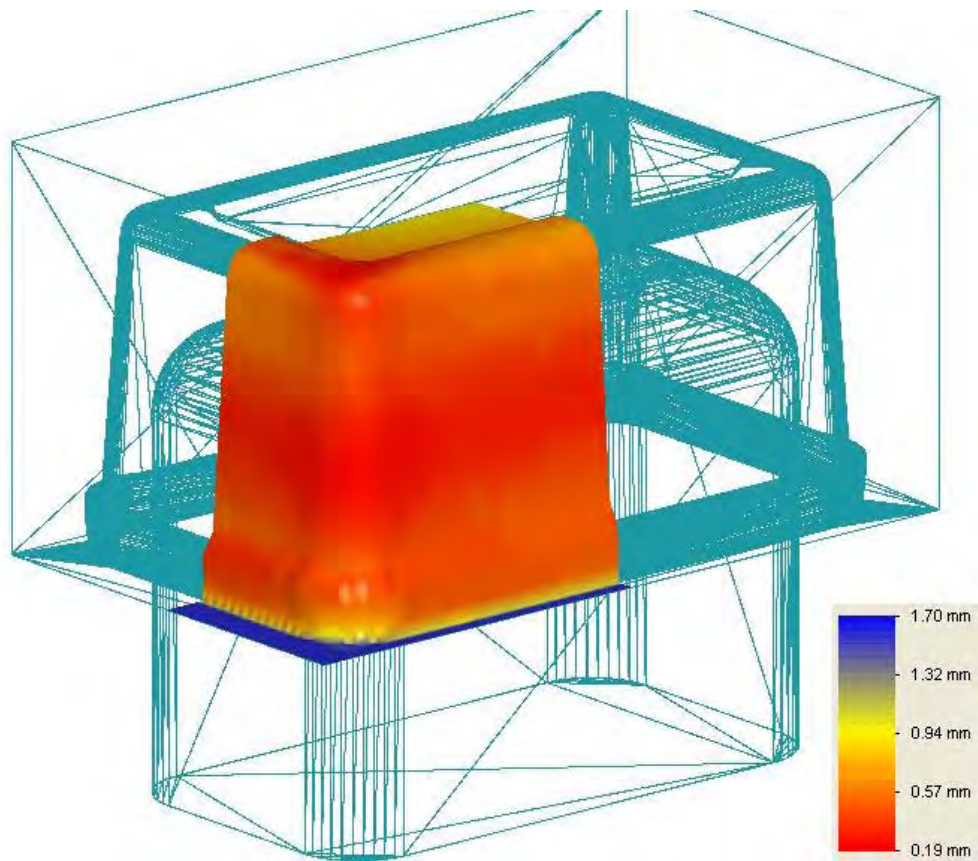
Para poder realizar una comparación de la distribución de espesores entre el producto real, la base rectangular 500 g., y la simulación del mismo con los datos recogidos del proceso real, se procedió a realizar en un $\frac{1}{4}$ de base rectangular 500 g. una división en secciones separadas cada 6 mm como lo muestra la figura 32. De acuerdo a estas divisiones se registraron y graficaron los datos para poder ser comparados.

Figura 32. Divisiones de la base rectangular 500 g..



El software T-SIM detalla la distribución de espesores en el producto simulado por medio de una escala de colores con su respectiva correspondencia en mm (figura 33).

Figura 33. Distribución de espesores de la simulación de la base rectangular 500 g..



En la gráfica de espesores se puede ver un acumulamiento de material al final del producto, el cual será analizado con los perfiles de espesores.

Perfil de espesores. Como se dijo previamente, el análisis del perfil de espesores se realizará en los cortes eje $X = 0$; eje $Y = 0$ y en el vértice de los cuales se obtuvieron las siguientes gráficas:

Figura 34. Gráfica perfil de espesores $X = 0$.

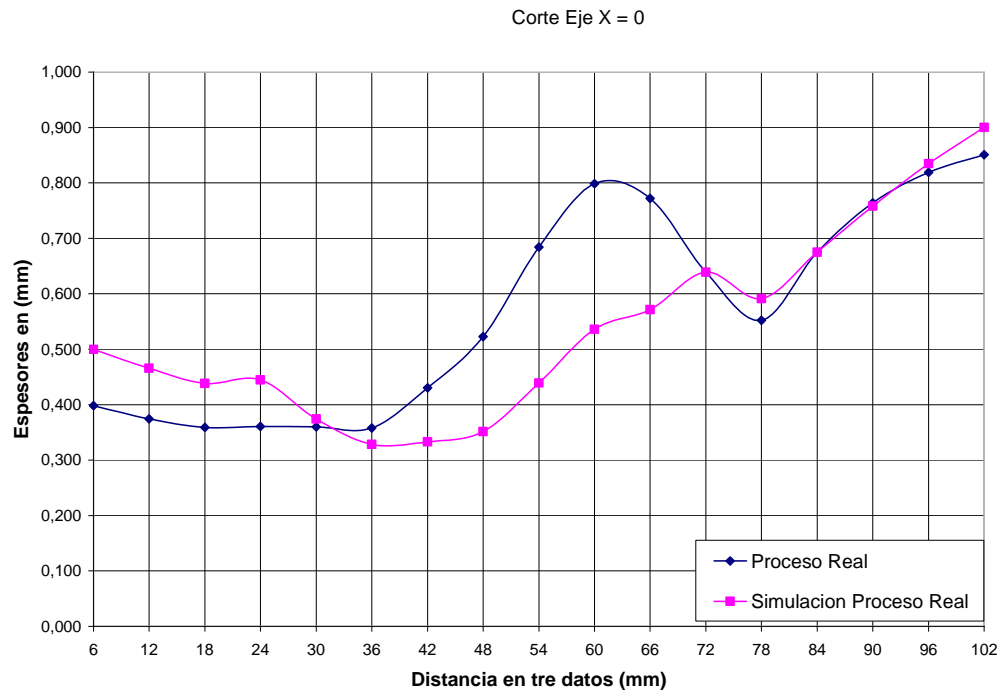


Figura 35. Gráfica perfil de espesores $Y = 0$.

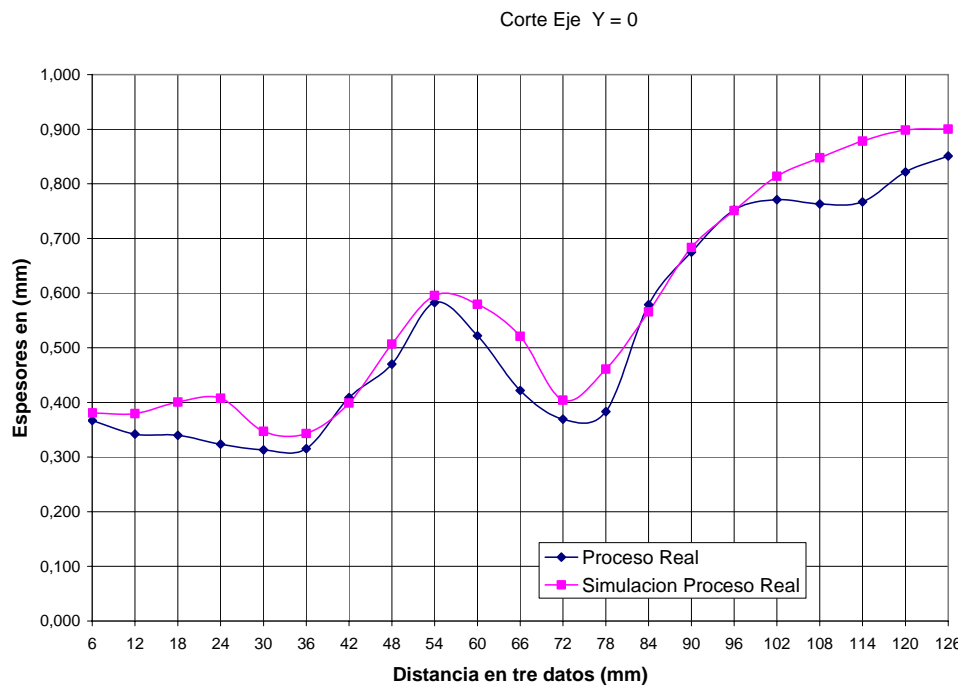
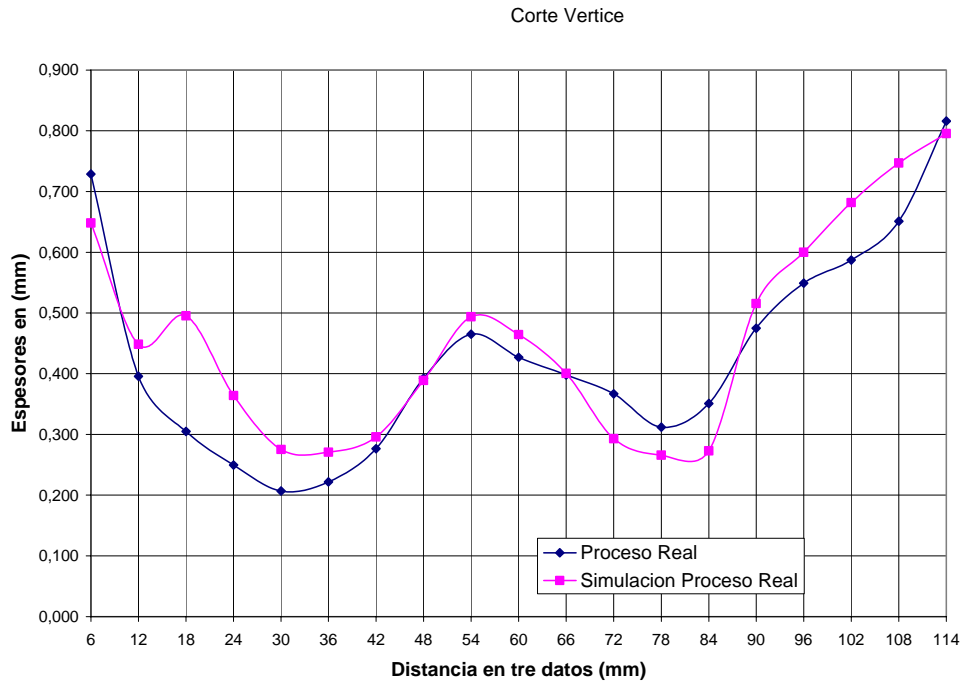


Figura 36. Gráfica perfil de espesores Vértice.



Se puede ver que el perfil de espesores de la simulación del proceso real no es un 100% igual al perfil de espesores medidos de la base rectangular 500 g. (Tablas 5, 6 y 7). Esto se puede deber a la gran variación que presenta el proceso entre un producto termoformado y otro bajo los mismos parámetros y variables de proceso. Otro aspecto a tener en cuenta es que al no contar con la caracterización del material real del proceso, la simulación presenta cierto margen de error. Sin embargo, de acuerdo a lo planteado por James L. Trone, es válido tener una diferencia de espesores de hasta el 30%.

Sin embargo de las gráficas del corte en el eje $Y = 0$ y del vértice se nota claramente que el software T-SIM simuló un acumulamiento en la parte final del producto, problema descubierto desde que se hizo la termoformación del producto base rectangular 500 g. en un lámina translúcida con el fin de encontrar dicho acumulamiento.

La gráfica del corte en el eje X no muestra dicho acumulamiento, que puede ser debido a cierta diferencia que puede encontrarse entre el plug con el cual se realiza el proceso de termoformación, ya que éste ha sido pulido y retocado a mano y se pueden haber generado formas que son difíciles de medir y, mas aún, difíciles de diseñar a la hora de hacer el plug en el software de CAD para utilizarlo en el T-SIM. Por esta razón es posible que los cortes por el eje X presenten una variación aún mayor.

La causa de dicho acumulamiento de material al fondo del producto base rectangular 500 g. se aclarara cuando se analice la influencia de cada uno de los parámetros en el proceso.

Tabla 5. Porcentaje de error de simulación en el eje x.

Espesores en X (mm)		
Simulación	Proceso Real	Porcentaje de error
0,499	0,398	25,499
0,466	0,374	24,479
0,438	0,359	22,116
0,445	0,361	23,298
0,374	0,360	3,997
0,329	0,358	8,215
0,333	0,430	22,661
0,352	0,523	32,742
0,439	0,684	35,794
0,536	0,799	32,884
0,572	0,772	25,967
0,639	0,639	0,025
0,592	0,552	7,161
0,675	0,675	0,023
0,758	0,764	0,763
0,835	0,819	1,931
0,900	0,851	5,766
PROMEDIO % DE ERROR		16,078

Tabla 6. Porcentaje de error de simulación en el eje y.

Espesores en Y (mm)		
Simulación	Proceso Real	Porcentaje de error
0,381	0,367	3,850
0,380	0,342	11,027
0,400	0,340	17,773
0,408	0,323	26,067
0,347	0,313	10,689
0,343	0,315	8,826
0,399	0,409	2,459
0,507	0,470	7,827
0,595	0,583	2,199
0,580	0,522	11,029
0,521	0,422	23,460
0,404	0,369	9,363
0,461	0,383	20,355
0,566	0,579	2,289
0,684	0,675	1,297
0,751	0,752	0,122
0,814	0,771	5,557
0,848	0,763	11,075
0,878	0,767	14,480
0,899	0,822	9,330
0,900	0,851	5,766
PROMEDIO % DE ERROR		9,754

Tabla 7. Porcentaje de error de simulación en el vértice.

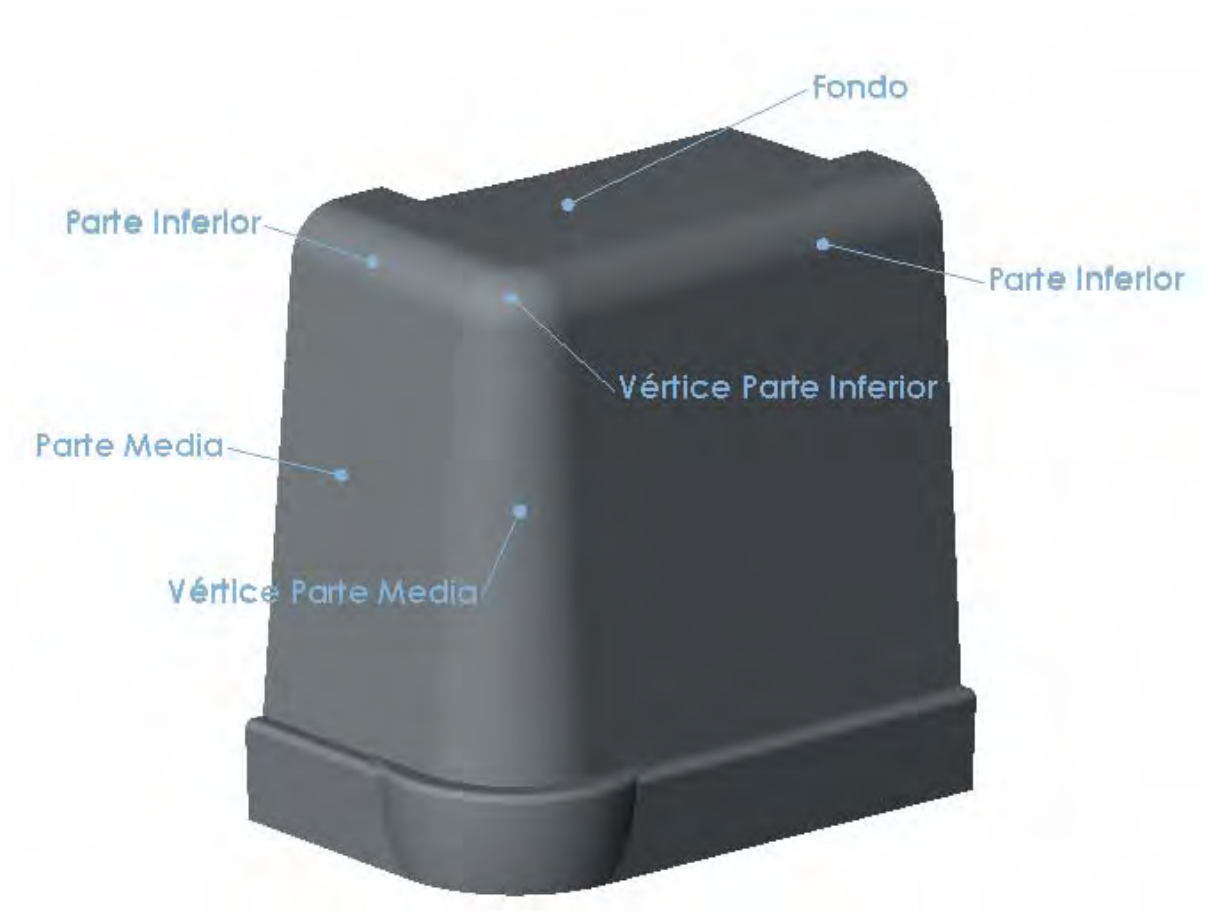
Espesores en el Vértice (mm)		
Simulación	Proceso Real	Porcentaje de error
0,648	0,729	11,060
0,448	0,396	13,344
0,495	0,305	62,376
0,364	0,250	45,830
0,275	0,207	33,140
0,271	0,222	22,072
0,296	0,276	7,045
0,389	0,392	0,874
0,494	0,465	6,184
0,464	0,427	8,738
0,400	0,398	0,628
0,293	0,367	20,110
0,266	0,312	14,741
0,273	0,351	22,206
0,515	0,475	8,501
0,600	0,549	9,293
0,682	0,587	16,139
0,747	0,651	14,753
0,795	0,816	2,515
PROMEDIO % DE ERROR		16,818

9. INFLUENCIA DE PARÁMETROS DE PROCESO EN LA SIMULACIÓN

Para analizar la influencia de los parámetros de proceso en la simulación de termoformación de plásticos, se corrieron simulaciones por cada variable o parámetro de proceso en donde la única variable que se cambió en dicha simulación es la del parámetro evaluado, manteniendo constantes todos las demás variables utilizadas para realizar la simulación del proceso real.

Para efectos de interpretación de los análisis se distribuirá la base rectangular en zonas como se muestra en la figura 37.

Figura 37. Zonas de análisis de la base rectangular 500 g..



9.1 MATERIA PRIMA

El hecho de cambiar la materia prima con la que es fabricada la base rectangular 500 g. implicaría generar un producto totalmente nuevo con nuevas propiedades mecánicas, físicas, químicas y de apariencia, y habría que entrar a analizar todo el proceso de nuevo, pues cada material tiene sus propias condiciones de proceso, y no sería posible termoformar un producto en poliestireno (PS) con variables y parámetros con los que se termoforma un producto en polipropileno (PP).

Siendo de esta forma no es posible analizar ninguna influencia de esta condición de proceso en la simulación de la termoformación.

La única forma en que la materia prima puede incidir en la simulación, es teniendo una buena caracterización del material con el que es fabricado el producto, ya que de esta forma estamos asegurando un parámetro de la simulación que puede incidir mucho en los resultados.

La variación que se presenta entre los datos de los perfiles de espesores tomados de la base rectangular 500 g. y los tomados de la simulación del proceso real puede ser el resultado de no haber realizado una debida caracterización de la materia prima con la que se termoforma el producto y como consecuencia haber utilizado un material de la base de datos del T-SIM que pueda que tenga un comportamiento reológico totalmente diferente.

9.2 TEMPERATURA DE LA LÁMINA

Cuando se realiza el proceso de termoformación teniendo la lámina muy fría (fase sólida) se puede generar un producto que no copie perfectamente la forma de la cavidad, lo que provoca que éste presente esfuerzos residuales altos, pero con mejores propiedades mecánicas. Por el contrario cuando la lámina está

demasiado caliente (fase de fusión), el producto tendrá mejor distribución de espesores, y menores esfuerzos residuales. En la simulación del proceso de termoformado se puede ver claramente dicho resultado analizando la distribución de esfuerzos residuales del producto. Para la comparación se realizan 2 simulaciones con una temperatura de lámina de +5 °C y -5°C del valor utilizado para la simulación normal. Los resultados se muestran en las figuras 38 y 39.

Figura 38. Esfuerzos residuales Temperatura de lamina 153 °C.

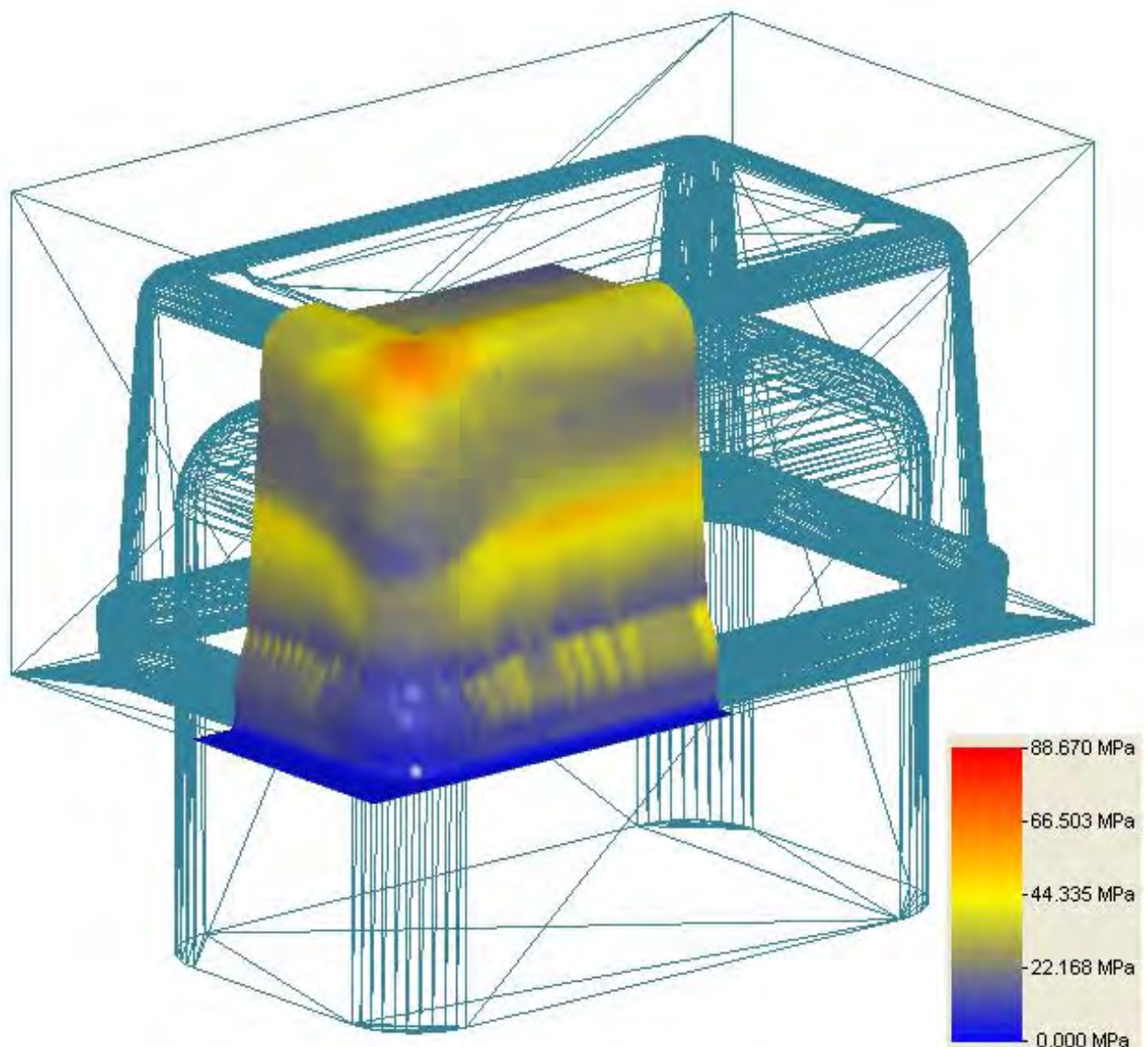
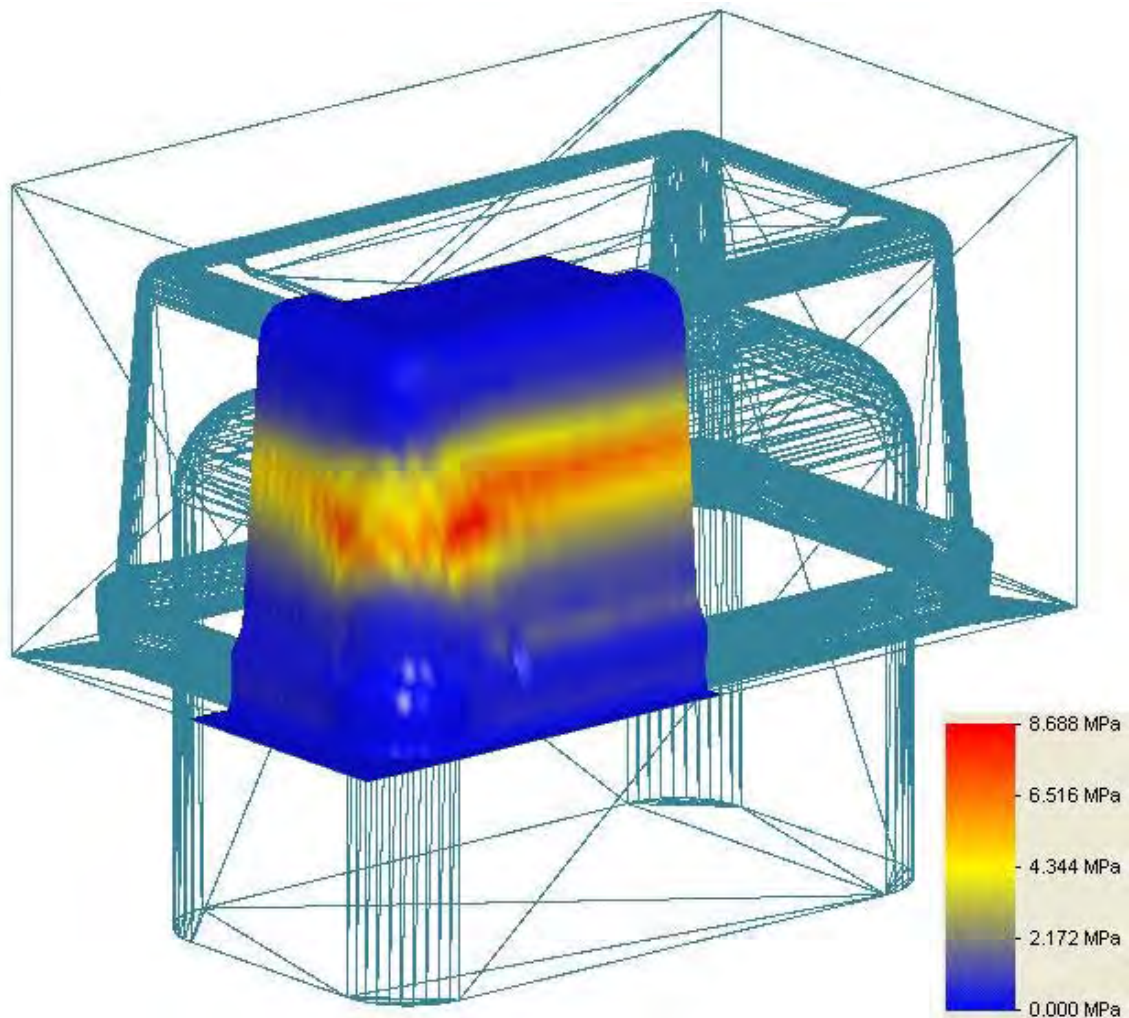


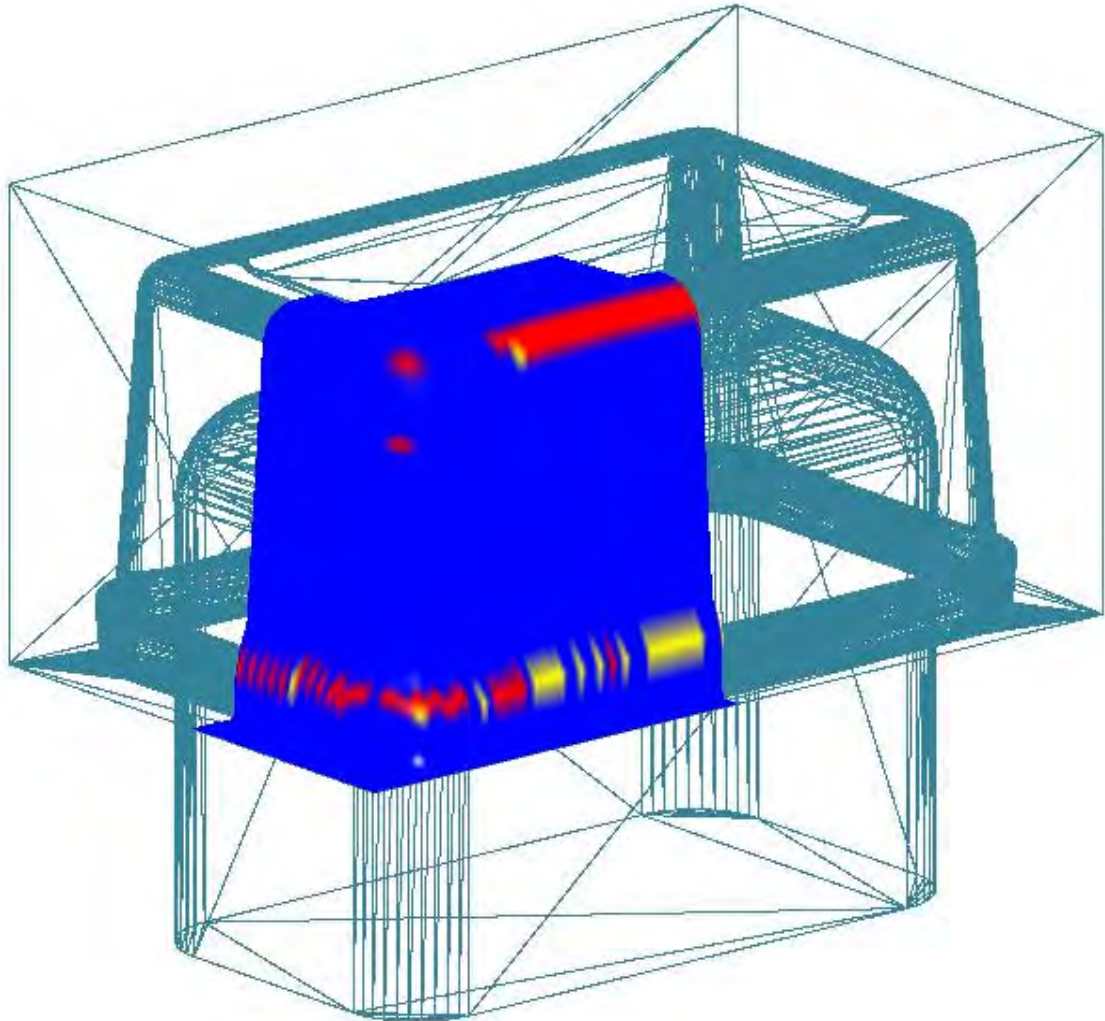
Figura 39. Esfuerzos residuales Temperatura de lamina 163 °C



Es notable la diferencia entre las dos gráficas, en donde al estar la lámina solo 5 grados más fría hay una gran generación de esfuerzos residuales en el producto, los cuales podrían incidir en las propiedades mecánicas requeridas del producto para poder servir de empaque, función para la cual fue diseñado.

Áreas críticas de venteo. Como se puede apreciar en la figura 40, la lámina termoformada a una temperatura de 153 °C no se adhirió totalmente a las paredes del molde, generando así un producto mal formado.

Figura 40. Áreas críticas de venteo.



Distribución de espesores.

- Simulación 1 = Temperatura de lámina 153 °C.
- Simulación 2 = Temperatura de lámina 153 °C.

Figura 41. Distribución de espesores Simulación 1.

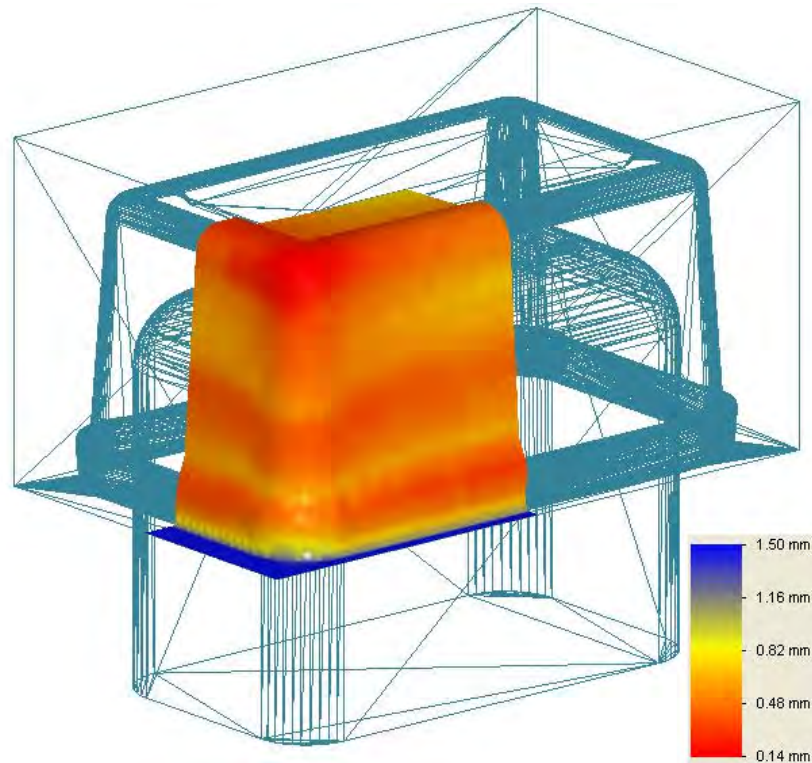
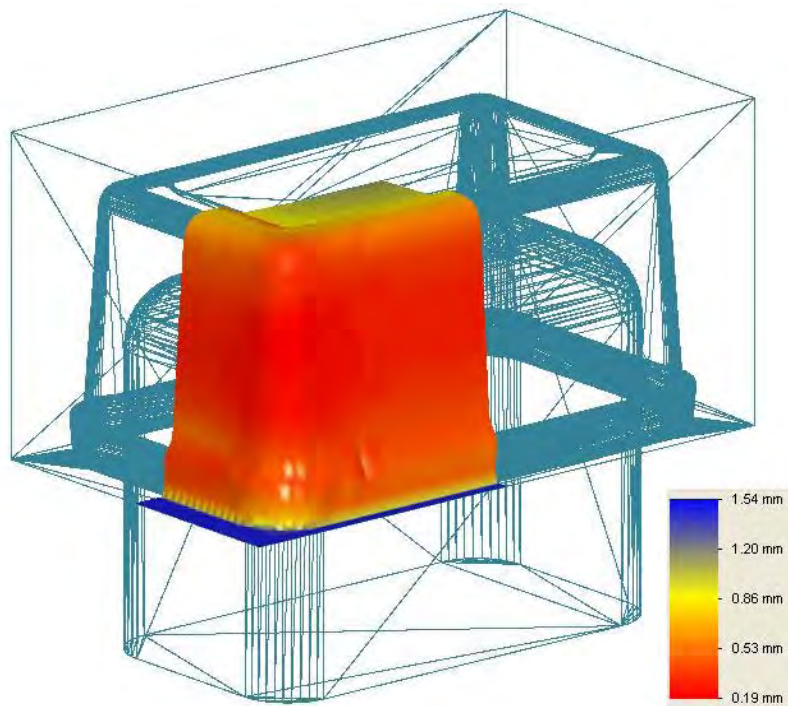


Figura 42. Distribución de espesores simulación 2.



Del perfil de espesores generado por la simulación de proceso con temperatura de lámina de 163 °C (simulación 2) se observa que se presenta un mayor arrastre del material al fondo del producto, lo cual genera que éste tenga un mayor peso. Por el contrario, la simulación 1, debido a que no se formó totalmente, muestra una distribución de espesores con zonas muy débiles, como por ejemplo en la esquina del fondo en el vértice, zona que debería tener mucho mas material por el requerimiento de la base rectangular 500 g. como empaque, ya que al ser apilada esta punta podría hundirse.

Figura 43. Gráfica perfil de espesores en X =0 para temperatura de lámina.

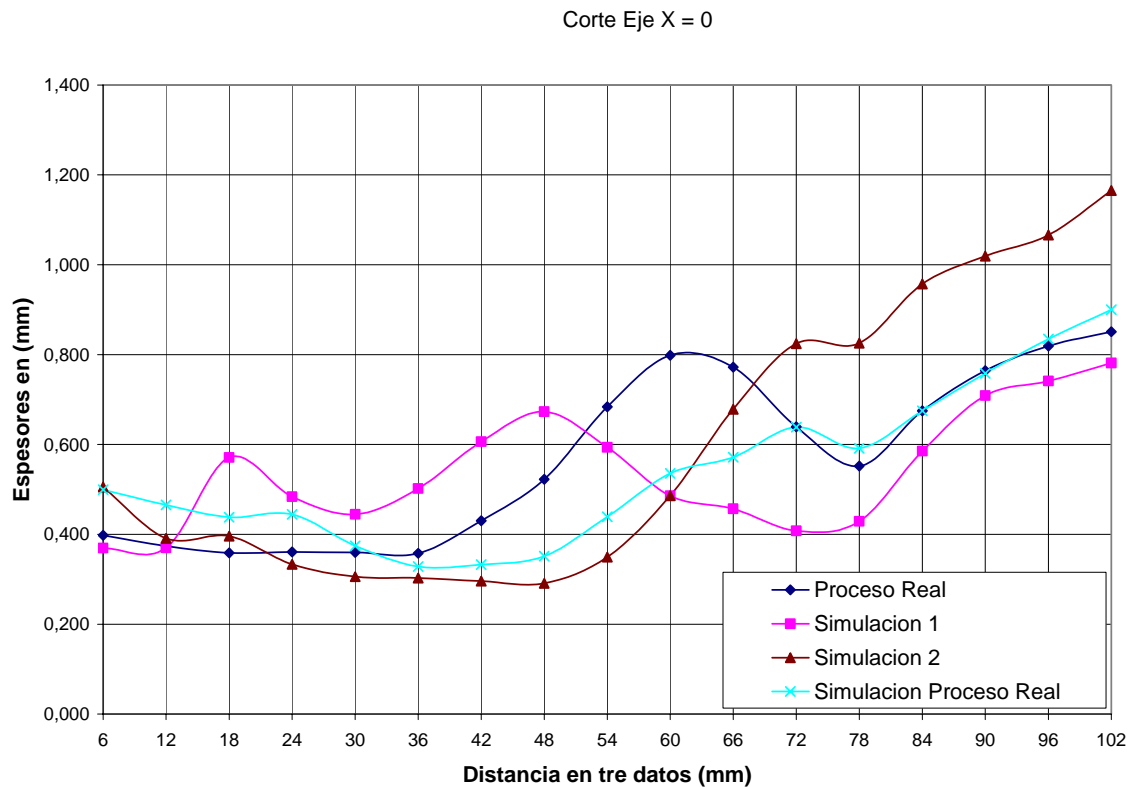


Figura 44. Gráfica perfil de espesores en $Y = 0$ para temperatura de lámina.

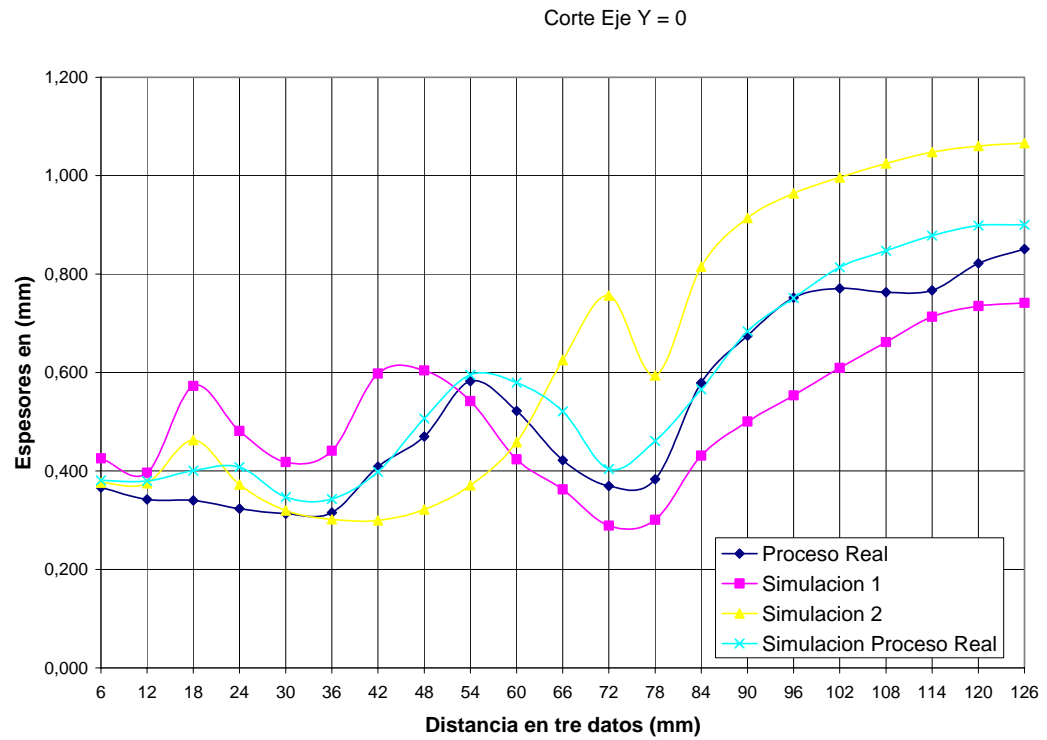
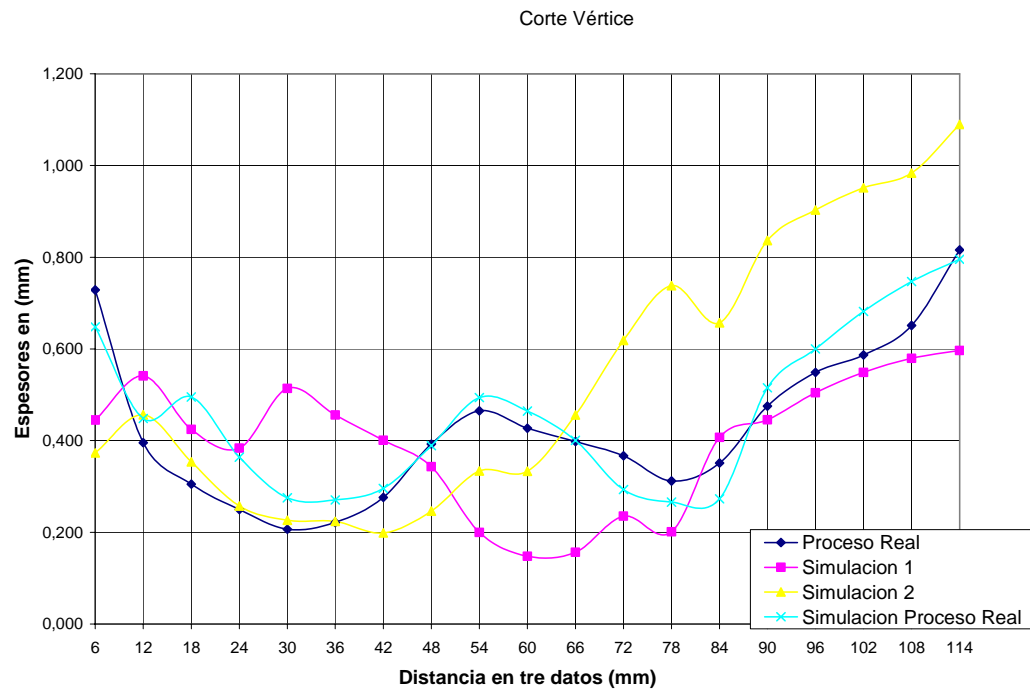


Figura 45. Gráfica perfil de espesores en el vértice para temperatura de lámina.



9.3 ESPESOR DE LA LÁMINA

La incidencia que tiene el espesor de lámina en el proceso de termofomación se ve reflejado en el resultado final del producto, el cual tendrá un mayor peso si el espesor se aumenta; de igual manera si el espesor se disminuye el peso del producto será menor.

La base rectangular 500 g. Se termoforma en producción normal con una lámina de 1.44 mm de espesor y el peso promedio del producto es de 16.5 g.. Para efectos de la Simulación se debe quitar la pestaña de la tarrina, ya que esta parte del producto se forma por compresión en el molde y no hace parte de la Simulación. La tarrina base rectangular de 500 g. Sin la pestaña pesa alrededor de 15.15 g..

El peso del producto se puede obtener de la Simulación del proceso real, seleccionando los elementos que forman el producto como lo muestra la figura 46.

Figura 46. Selección de elementos.



El peso que muestra la Simulación de proceso real es de 3.71 g.. Dado que se trata de $\frac{1}{4}$ de la base, el peso deberá ser multiplicado por 4 dando como resultado un valor de 14.84 g.. La Simulación realizada con una lámina con un espesor de 1.48 mm arrojó como resultado un peso total de la tarrina de 15.39 g., lo cual evidencia que a mayor espesor de la lámina, mayor peso del producto.

9.4 TEMPERATURA DEL MOLDE

El software T-sim para efectuar las Simulaciones utiliza 2 módulos independientes, uno con el cual analiza la parte de formado del producto y otro con el que analiza el enfriamiento del mismo.

Este trabajo de grado solo se centra en analizar la parte del formado del producto, ya que la simulación de enfriamiento consiste en establecer un tiempo determinado para el cual el producto ya formado tendrá un valor de temperatura con el cual podrá ser expulsado del molde.

Siendo de esta manera, el valor de la temperatura del molde no influye en la parte del formado del producto como se muestra en las figuras 47 y 48. La temperatura del molde podría llegar a influir en la Simulación del producto mientras éste se está formando y suceda que roce la lámina en estiramiento contra alguna de las paredes de la cavidad, pero éste no es el caso.

Esfuerzos Simulación. De las dos Simulaciones realizadas, analizando los resultados se puede notar que no hay mayor cambio en cuanto a la generación de esfuerzos Simulación en el producto como se puede ver en las figuras 47 y 48.

- Simulación 1 = Temperatura de molde de 25 °C.
- Simulación 2 = Temperatura de molde de 35 °C.

Figura 47. Esfuerzos residuales Temperatura de molde 25 °C.

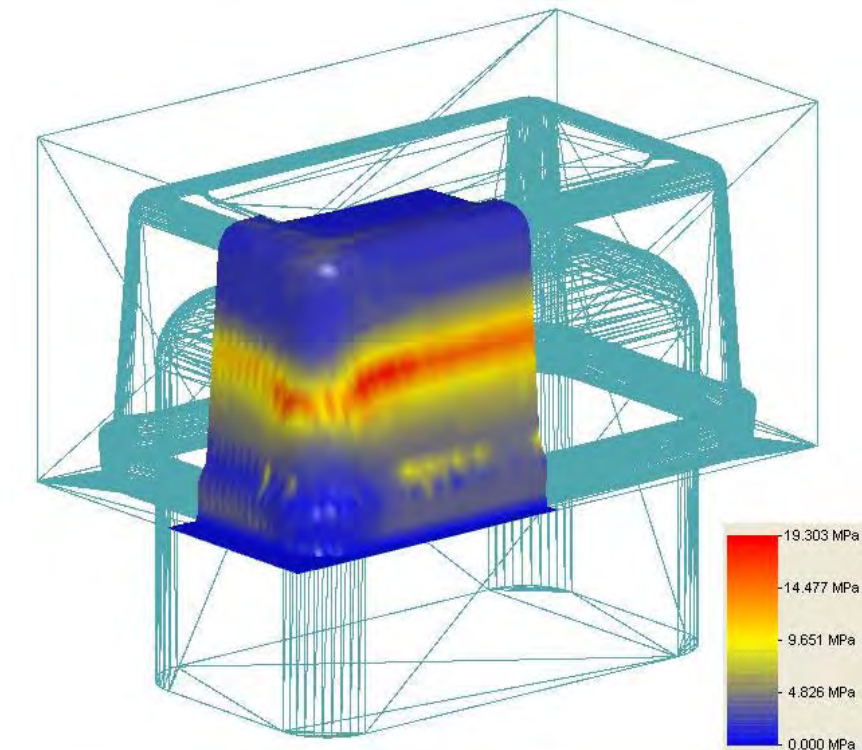


Figura 48. Esfuerzos residuales Temperatura de molde 35 °C.

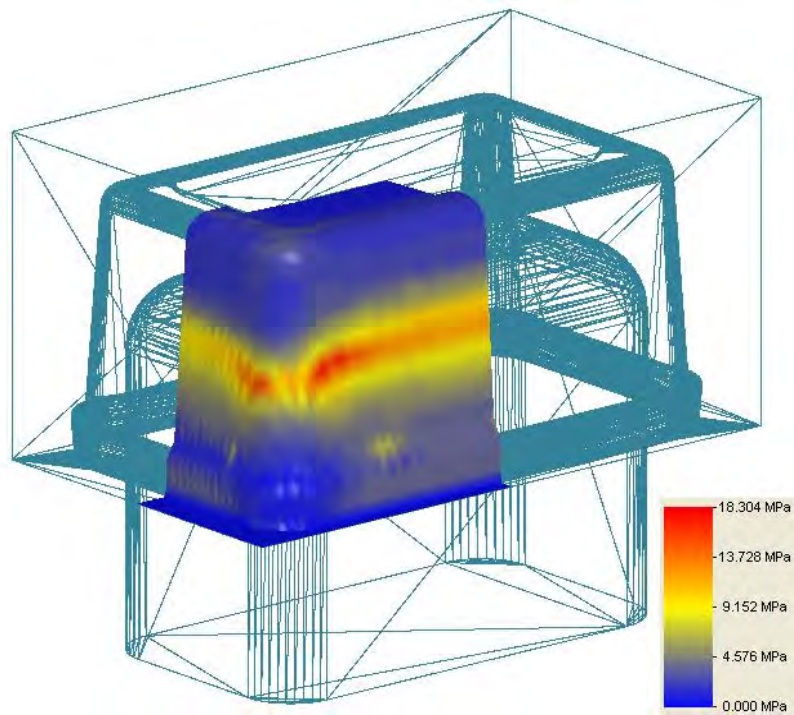


Figura 49. Distribución de espesores temperatura de molde 25 °C.

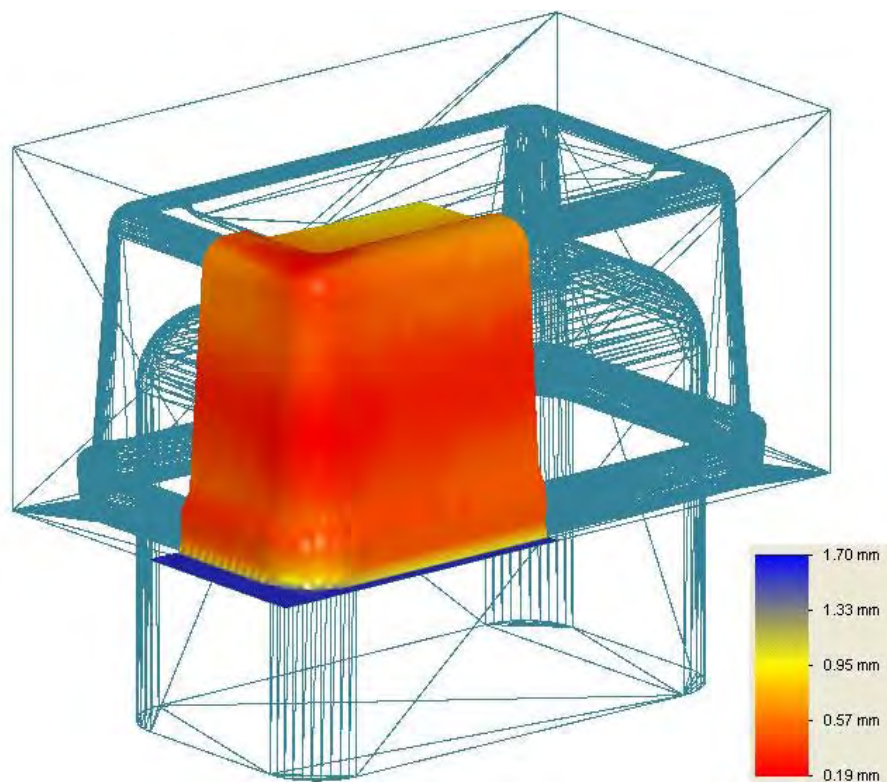


Figura 50. Distribución de espesores temperatura de molde 35 °C.

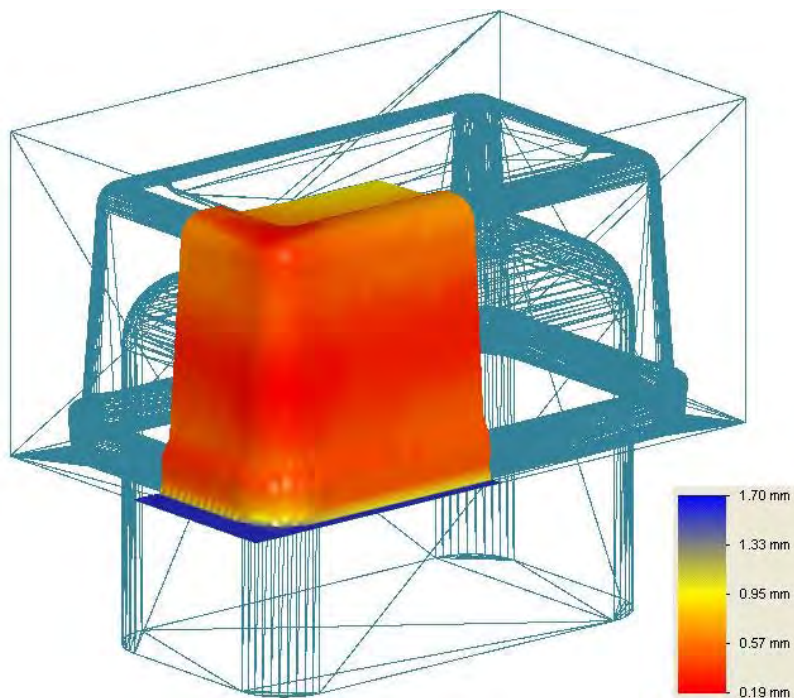


Figura 51. Distribución de espesores en $X = 0$ para temperatura de molde.

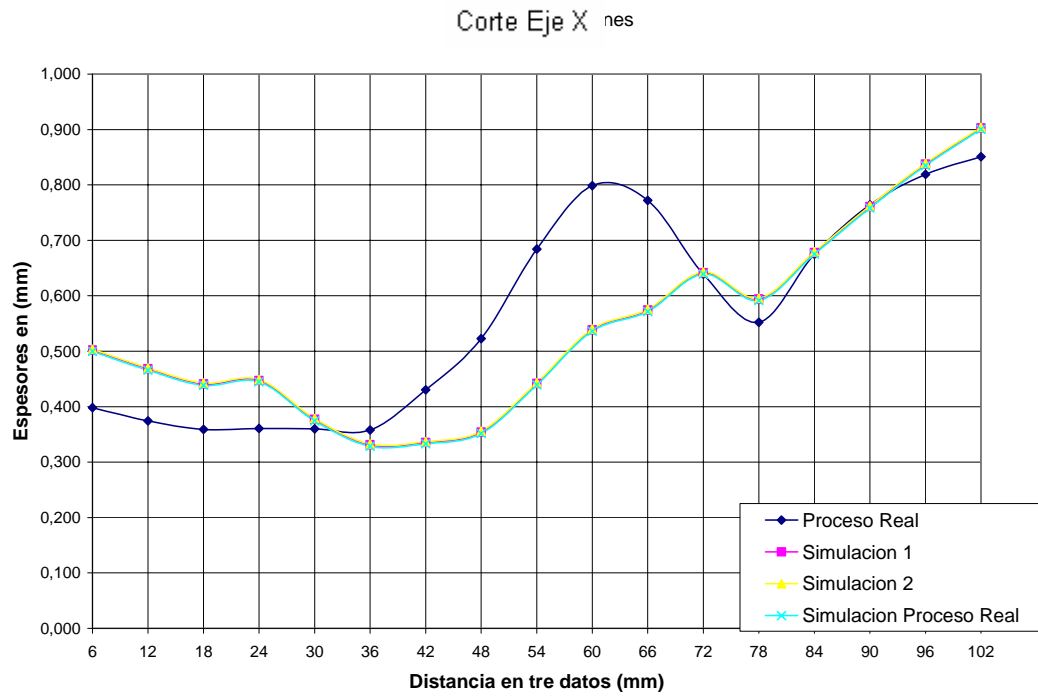


Figura 52. Distribución de espesores en $Y = 0$ para temperatura de molde.

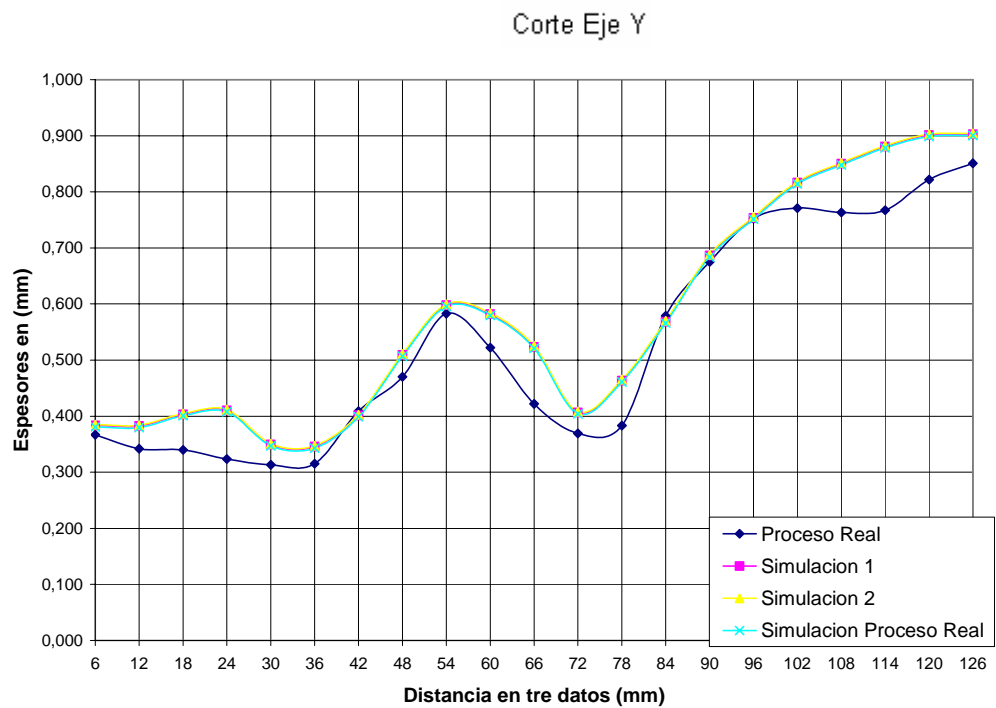
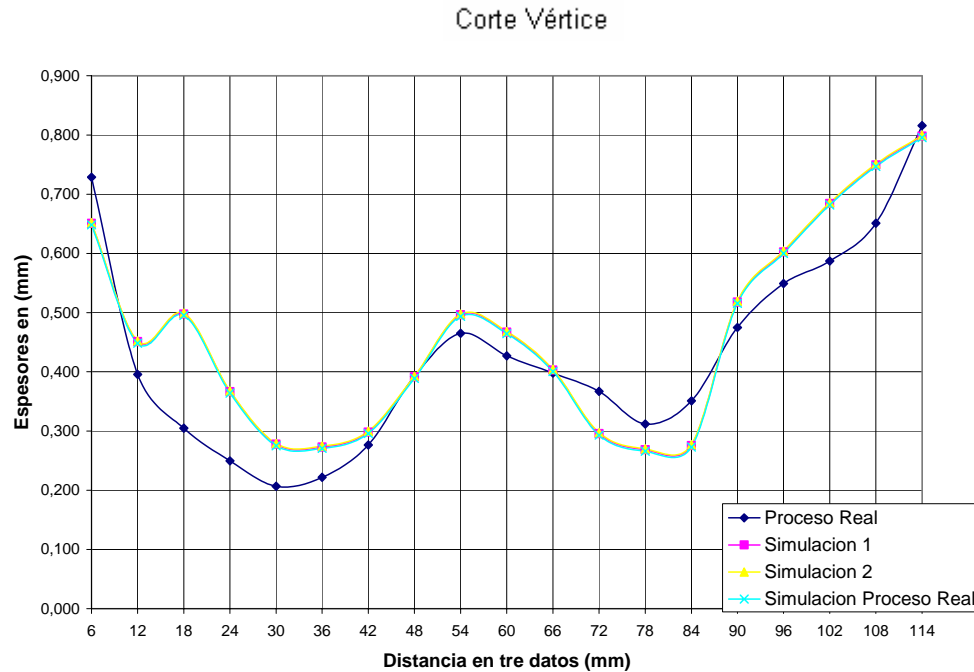


Figura 53. Distribución de espesores en el vértice para temperatura de molde.



9.5 TEMPERATURA DEL PULG

La temperatura del pulg es muy importante, ya que si ésta es baja, el plug absorberá el calor de la lámina provocando que las zonas de la lámina en contacto con el plug se enfríen antes de que entre el aire de formado, causando que el producto final no copie la forma de la cavidad, o que se presente un acumulamiento de material en el producto final, como se presenta en la base rectangular 500 g., la cual tiene un acumulamiento de material en el fondo, que puede ser causado por la temperatura del plug, por el coeficiente de transferencia de calor del material del plug o por el recorrido del plug.

Distribución de espesores.

- Simulación 1 = Temperatura del plug 30 °C.
- Simulación 2 = Temperatura del plug 50°C.

Figura 54. Distribución de espesores temperatura del plug 30°C.

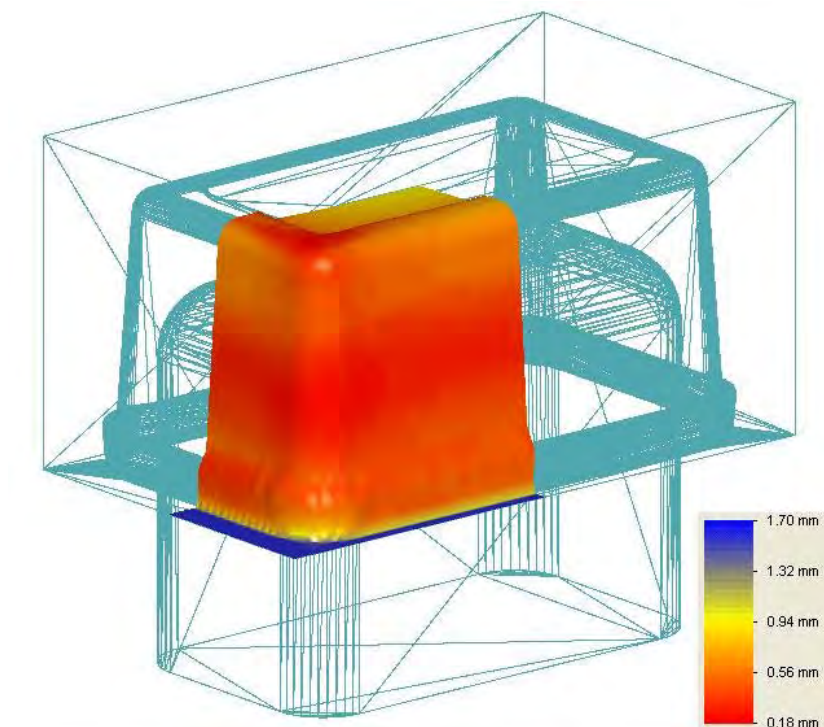


Figura 55. Distribución de espesores temperatura del plug 50 °C.

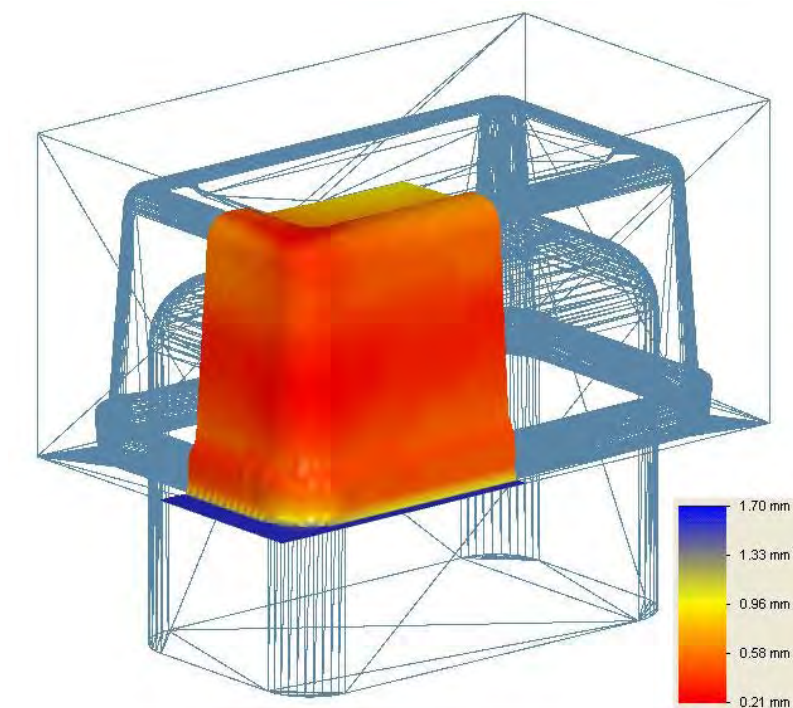


Figura 56. Distribución de espesores en $X = 0$ para temperatura del plug.

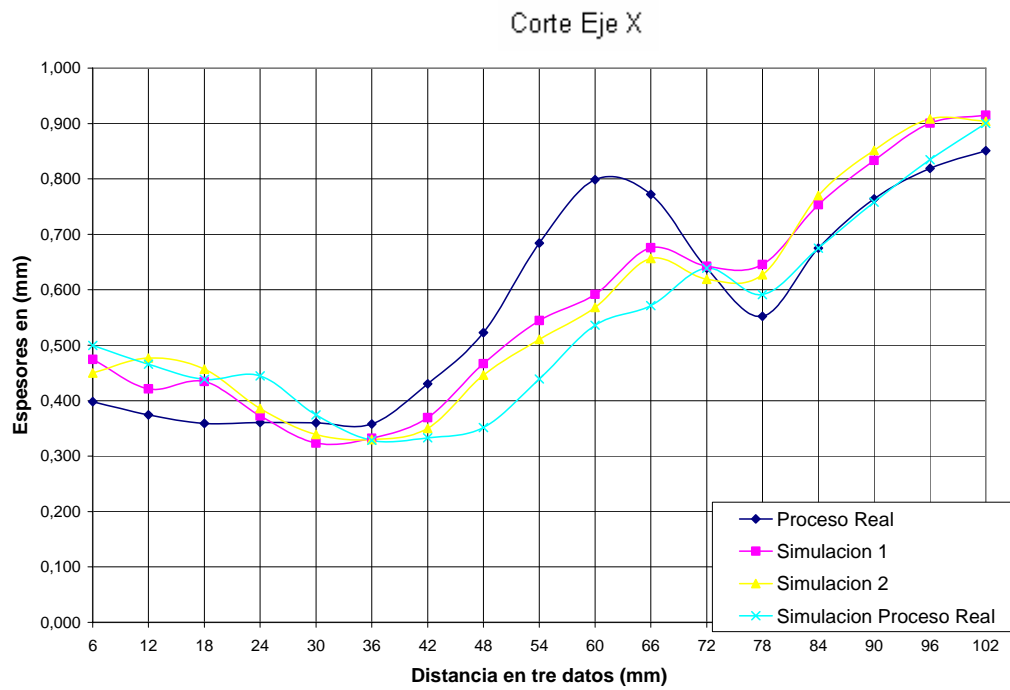


Figura 57. Distribución de espesores en $Y = 0$ para temperatura del plug.

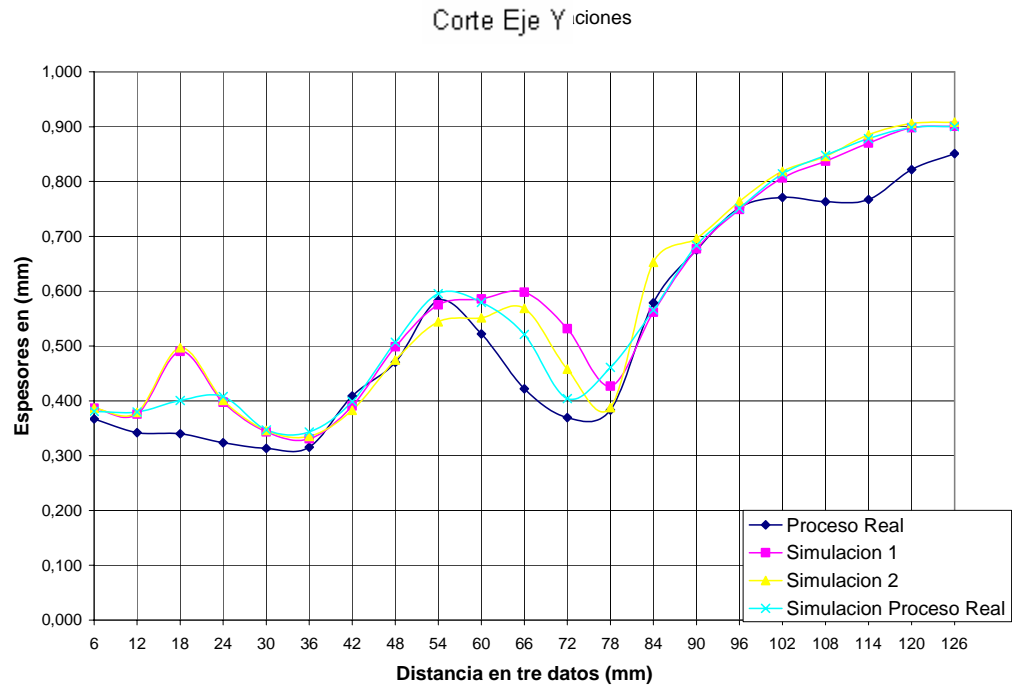
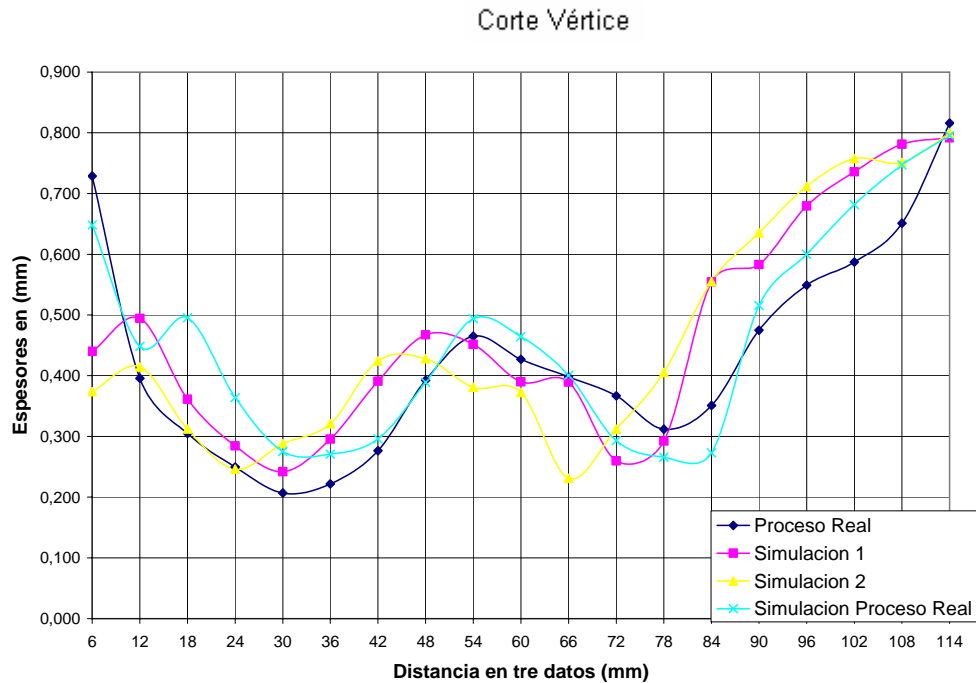


Figura 58. Distribución de espesores en el vértice para temperatura del plug.

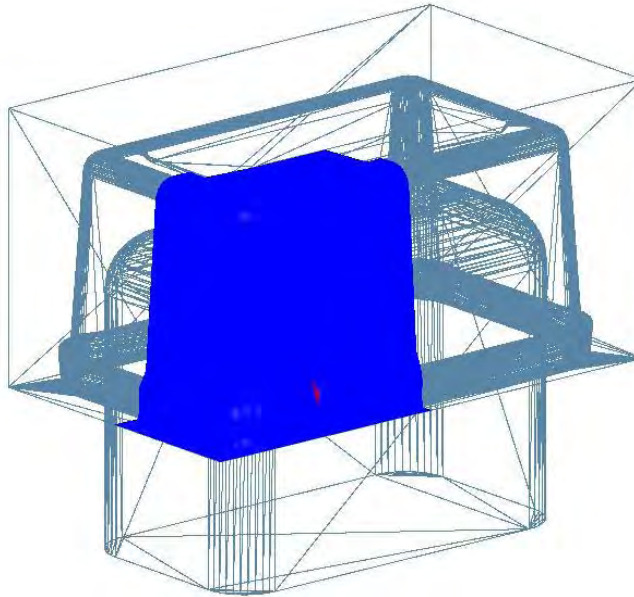


9.6 PRESIÓN DE AIRE DE FORMADO

La base rectangular 500 g. se termoforma con una presión de aire de 8 bar, los cuales son requeridos para poder despegar la lámina del plug y lograr que ésta copie forma de la cavidad.

Se realizó una simulación variando el valor de la presión de aire de formado en 2 bares por debajo del valor registrado en el ensayo de termoformación del producto base rectangular 500 g., de la cual se puede observar que el proceso para termoformar el producto base rectangular 500 g., si se mantienen todos los demás parámetros anteriormente establecidos, se puede llegar a procesar con una presión de 6 bares como lo muestra la figura 59, en la cual se aprecia un área mínima que no se encuentra en contacto total con la cavidad, pero que puede llegar a ser considerado como un buen resultado.

Figura 59. Áreas de venteo presión de aire de formado de 6 bares.



Distribución de Espesores. A pesar que la base rectangular queda bien formada la distribución de espesores no es igual a la del proceso real.

Figura 60. Distribución de espesores presión del aire de formado 6 bar.

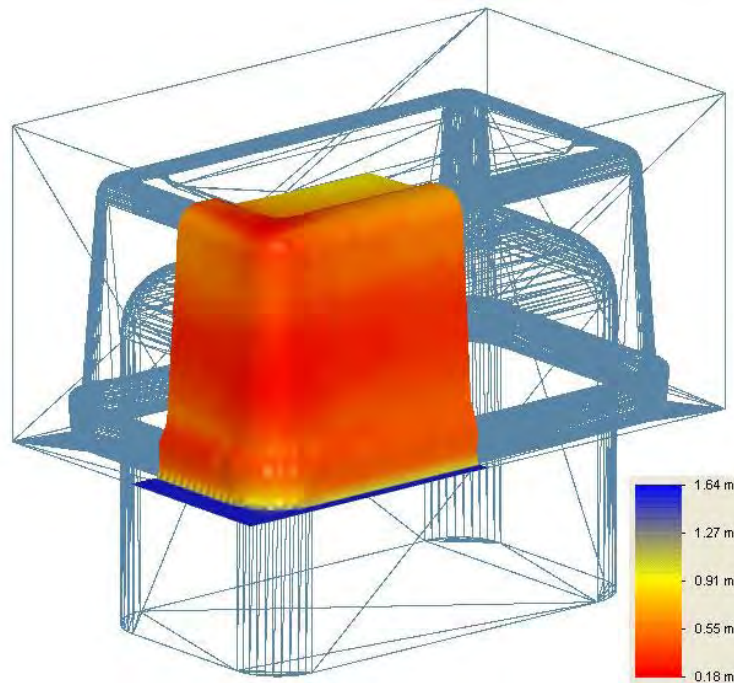


Figura 61. Distribución de espesores en $X = 0$ para presión de aire de formado de 6 bar.

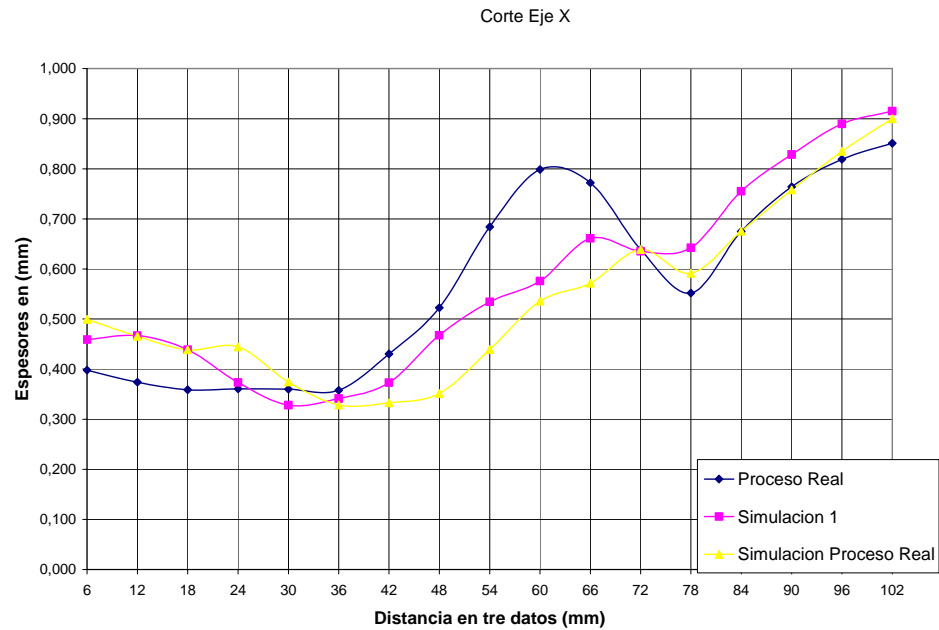


Figura 62. Distribución de espesores en $Y = 0$ para presión de aire de formado de 6 bar.

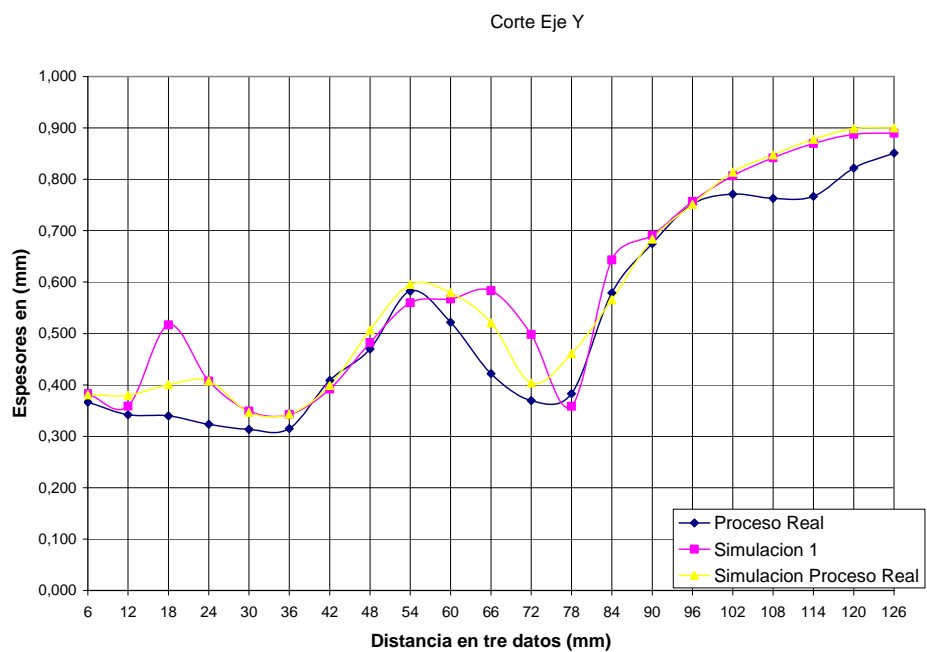
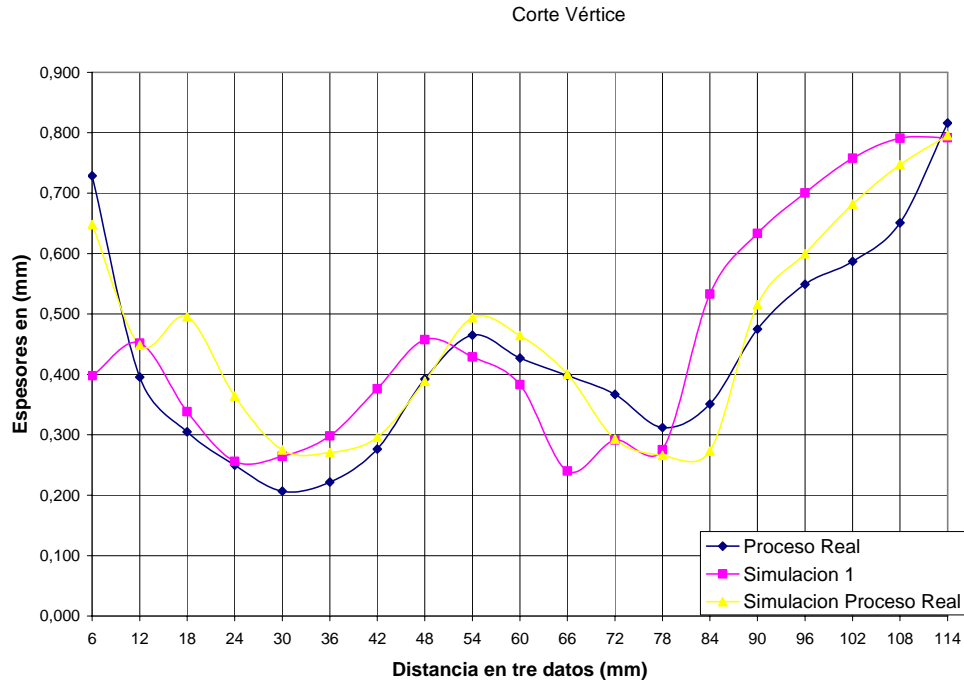


Figura 63. Distribución de espesores en el vértice para presión de aire de formado de 6 bar.



9.7 MATERIAL DEL PLUG

El material de plug no tiene representación alguna en el proceso de simulación. La influencia del material del plug como tal, se verá reflejada en los análisis que se realicen a los parámetros de proceso transferencia de calor del plug y coeficiente de fricción, ya que estas 2 variables dependen exclusivamente del material que se usa para la fabricación del plug.

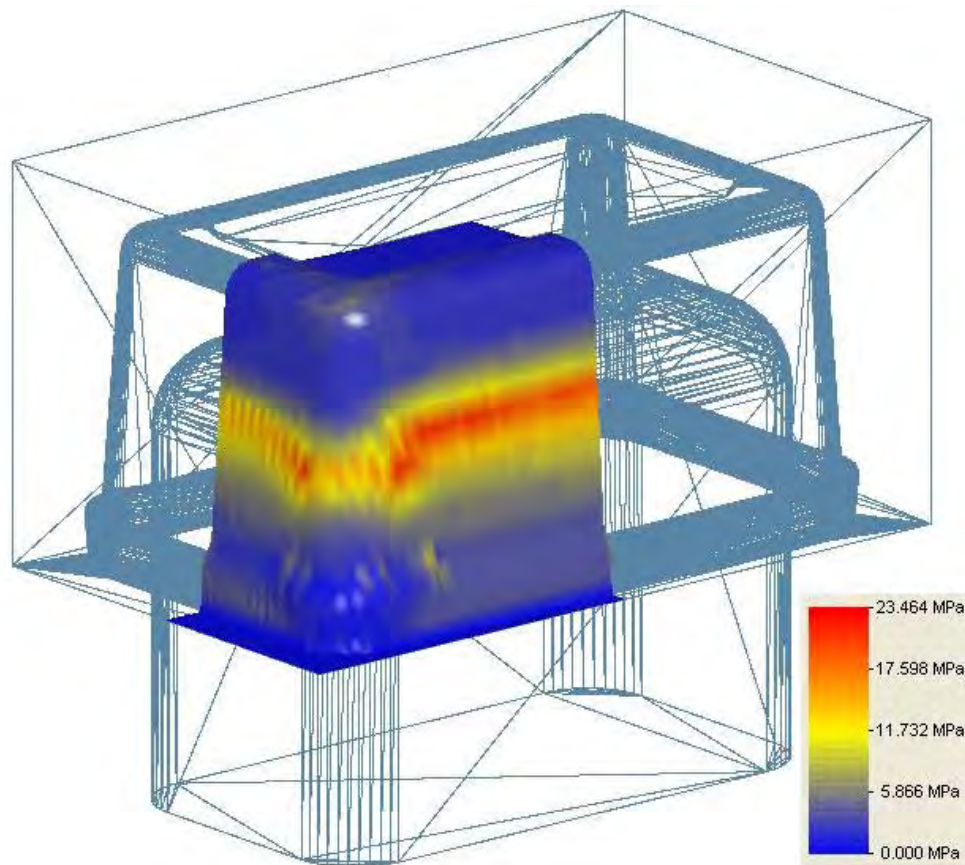
9.8 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-PLUG

Esta variable es importante en la simulación del proceso de termoformación, ya que es la que determina la cantidad de calor que se trasfiere de la lámina que se

encuentra a mayor temperatura hacia el plug que se encuentra a una menor temperatura.

De esta manera se puede determinar que los mejores materiales para la fabricación del plug son aquellos que tengan una conductividad térmica baja. Para corroborar lo anteriormente dicho se realiza una simulación, con un valor de transferencia de calor entre plug y lámina de $60 \frac{W}{m^2 K}$ (simulación 1), la cual muestra que por ser mayor la transferencia de calor, el plug absorberá mas calor de la lámina logrando enfriarla en las zonas que estén en contacto, provocando así una termoformación de una lámina que generará zonas con acumulamiento de material e incrementos de esfuerzos residuales como se muestra la figura 64.

Figura 64. Esfuerzos residuales Transferencia de calor Plug –Lámina.



Distribución de espesores. Interpretando las gráficas de los perfiles de espesores en los 3 cortes, se nota que la simulación 1 presenta un mayor acumulamiento de material, ya no en la parte inferior de la base como se presentó en la simulación real y en el perfil del producto real, sino más hacia la parte media del producto. Este acumulamiento hace que se presente una zona débil con un espesor por debajo de los 0.2 mm en la parte inferior del vértice del producto, zona que presentaría problemas si se llegase a termoformar de esta forma, ya que no soportaría la carga de compresión que debe cumplir como especificación de calidad.

Figura 65. Distribución de espesores en $X = 0$ para Coef. transferencia de calor plug-lámina.

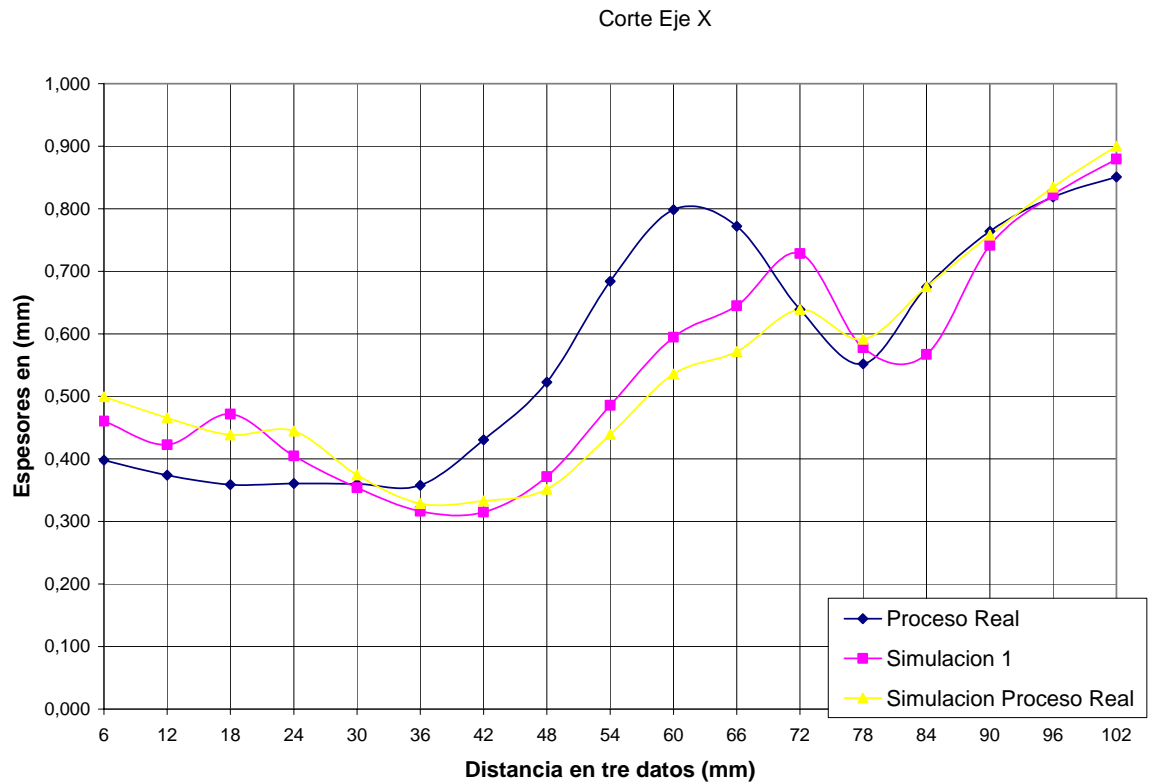


Figura 66. Distribución de espesores en $Y = 0$ para Coef. transferencia de calor plug-lámina.

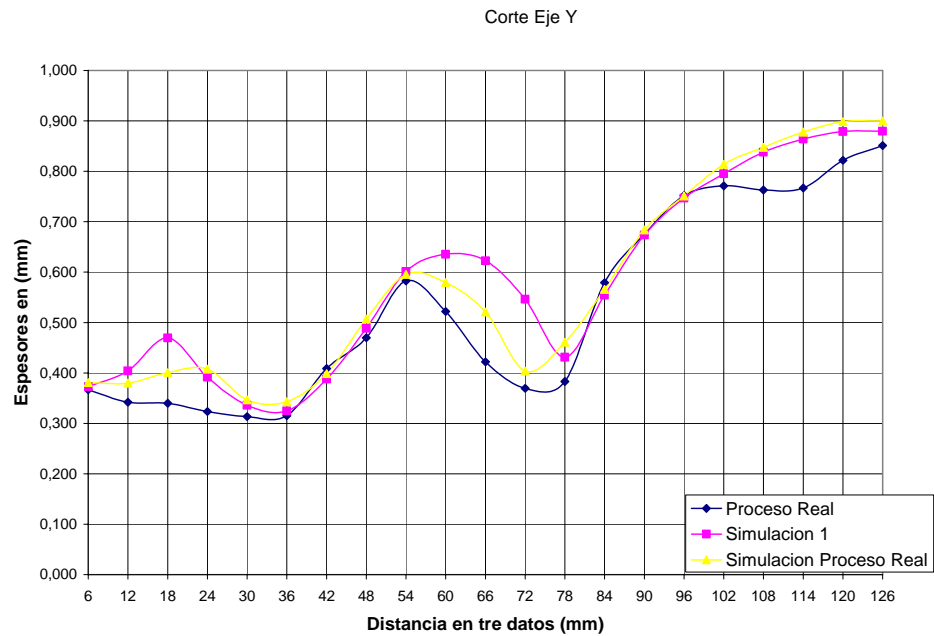
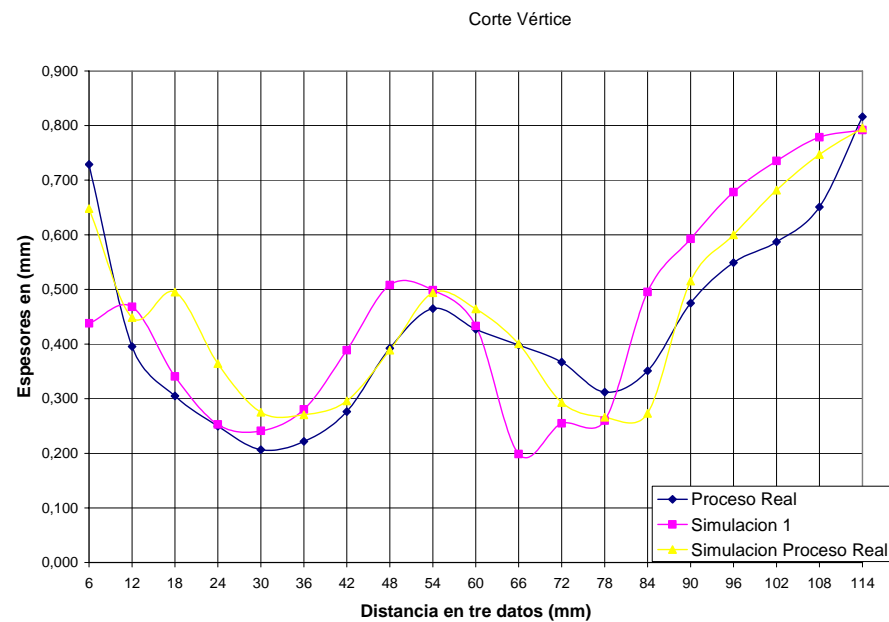


Figura 67. Distribución de espesores en el vértice para Coef. transferencia de calor plug-lámina.



9.9 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR LÁMINA-CAVIDAD

Al igual que el parámetro de proceso temperatura del plug, el coeficiente de transferencia de calor entre la lámina y el plug influye considerablemente en la parte de la simulación del enfriamiento, pues como se describía anteriormente durante el proceso del formado la lámina no toca las paredes del molde mientras el plug desciende realizando el trabajo de estiramiento de la lámina.

Se simula el proceso de termoformación utilizando dos valores de coeficiente de transferencia de calor entre la cavidad y la lámina, uno por encima del valor utilizado en la simulación de proceso real y el otro por debajo, de las cuales se puede notar que se presentan mayores esfuerzos residuales en el producto simulado con un coeficiente de transferencia de $624 \frac{W}{m^2 K}$ (simulación 2), en comparación al simulado con un coeficiente de transferencia de $424 \frac{W}{m^2 K}$ (simulación 1), como se muestra en las figuras 68 y 69 respectivamente; esto se puede presentar debido a que si tiene un coeficiente de transferencia de calor mas alto, éste afecta la temperatura de la lámina y, como ya se ha demostrado, los esfuerzos residuales son dependientes del valor de la temperatura de la lámina.

Figura 68. Esfuerzos residuales Coeficiente transferencia de calor = $424 \frac{W}{m^2 K}$

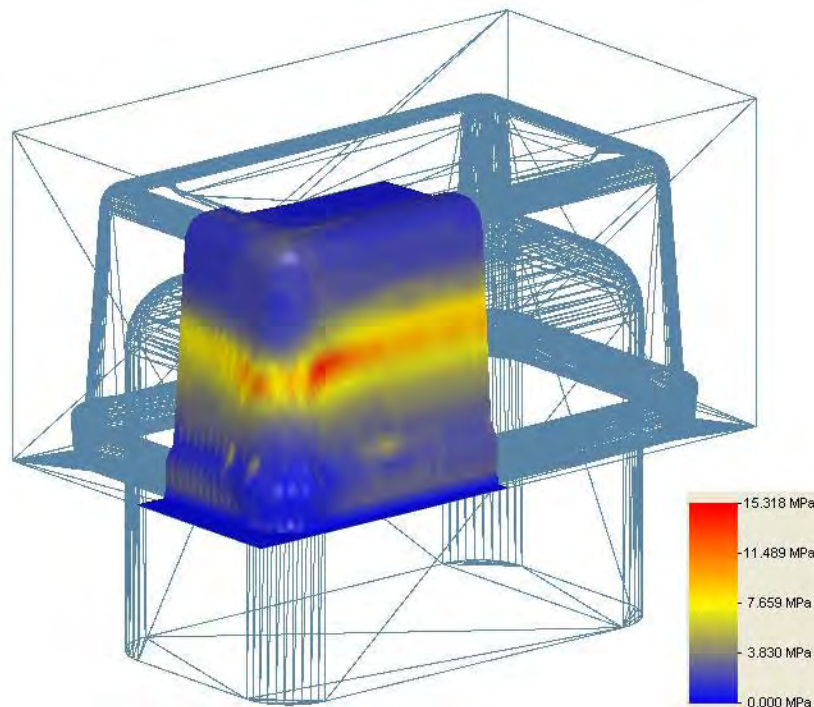
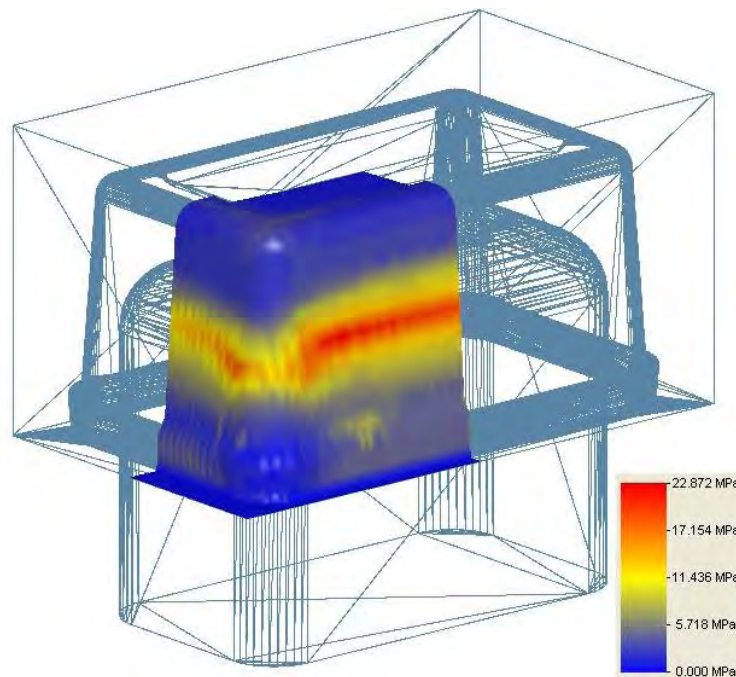


Figura 69. Esfuerzos residuales Coeficiente transferencia de calor = $624 \frac{W}{m^2 K}$



Distribución de espesores. Analizando los perfiles de espesores generados por los tres cortes en la base rectangular 500 g. se puede notar que la diferencia entre las simulaciones realizadas variando el coeficiente de transferencia de calor entre la cavidad y la lámina no son muy significativas, debido a que este parámetro de proceso influye básicamente en la simulación del enfriamiento

Figura 70. Distribución de espesores coeficiente transferencia de calor = 424

$$\frac{W}{m^2 K}$$

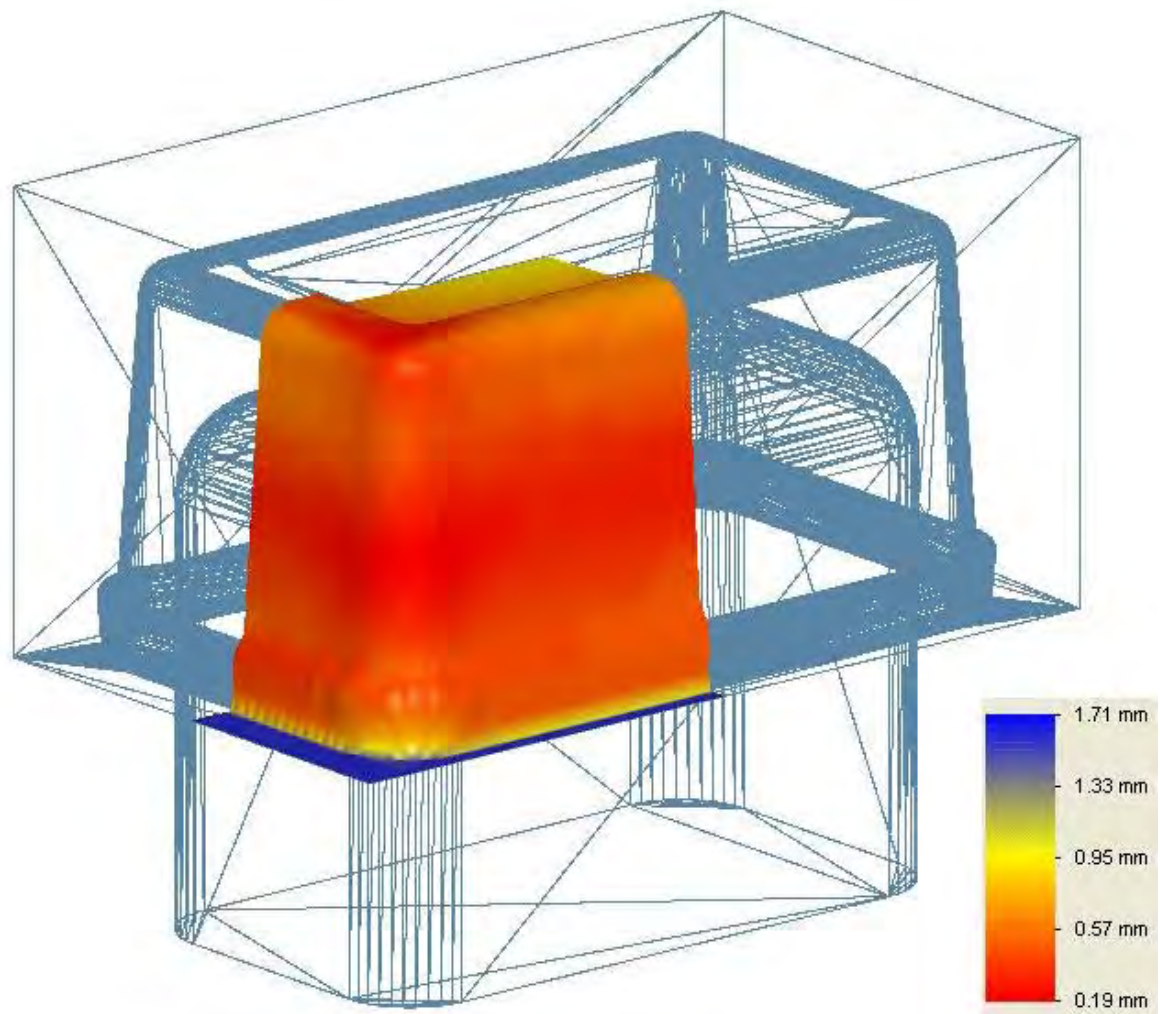


Figura 71. Distribución de espesores coeficiente transferencia de calor = 624

$$\frac{W}{m^2 K}$$

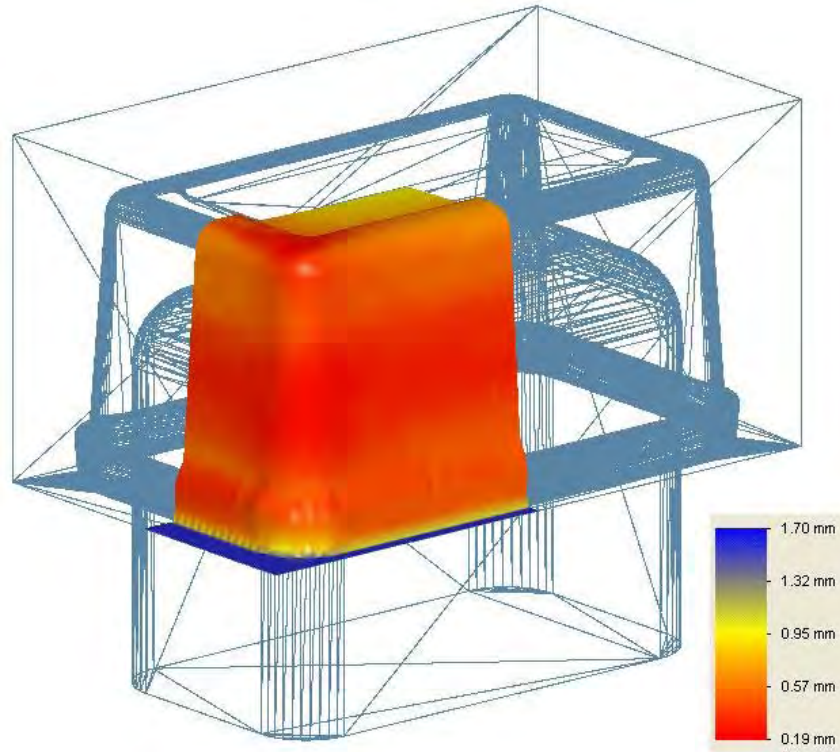


Figura 72. Distribución de espesores en $X = 0$ para Coef. Transferencia de calor lámina-cavidad.

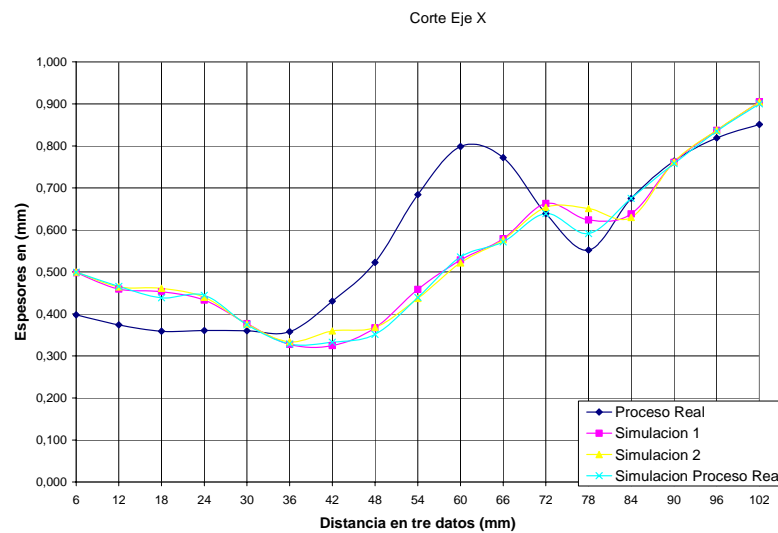


Figura 73. Distribución de espesores en $Y = 0$ para Coef. Transferencia de calor lámina-cavidad

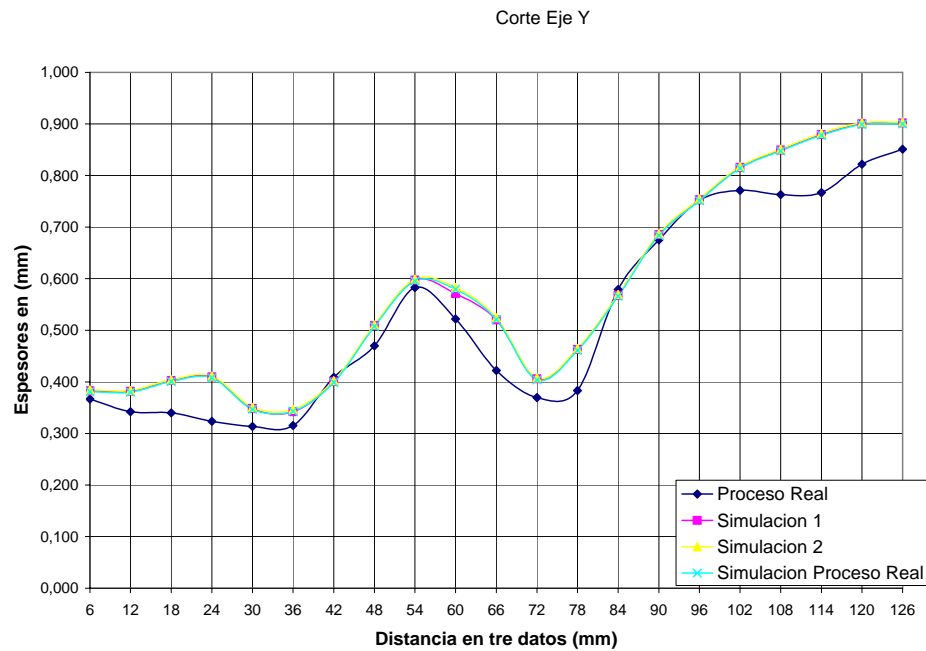
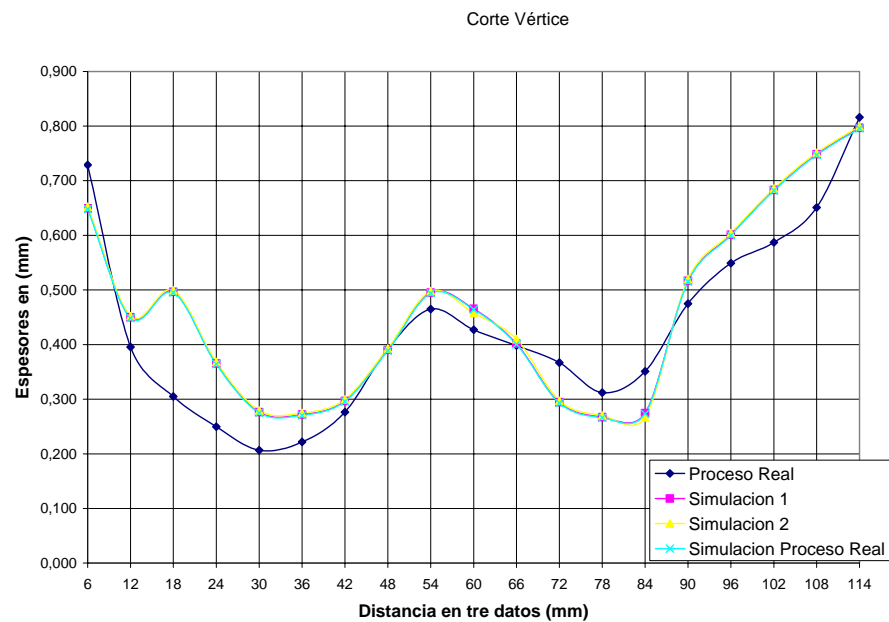


Figura 74. Distribución de espesores en el vértice para Coef. Transferencia de calor lámina-cavidad



9.10 FORMA DEL PLUG

Una de las mayores aplicaciones que se le puede dar al software para la simulación del proceso de termoformación T-SIM, es simular la influencia de la forma del plug, ya que todos los demás parámetros pueden llegar a ser probados por ensayo y error asumiendo un costo relativamente bajo, pero probar un plug por ensayo y error implicaría la fabricación de los diferentes plugs a ser probados, generando grandes costos, pues el hytac, material en el que se fabrican los plugs, es bastante costoso.

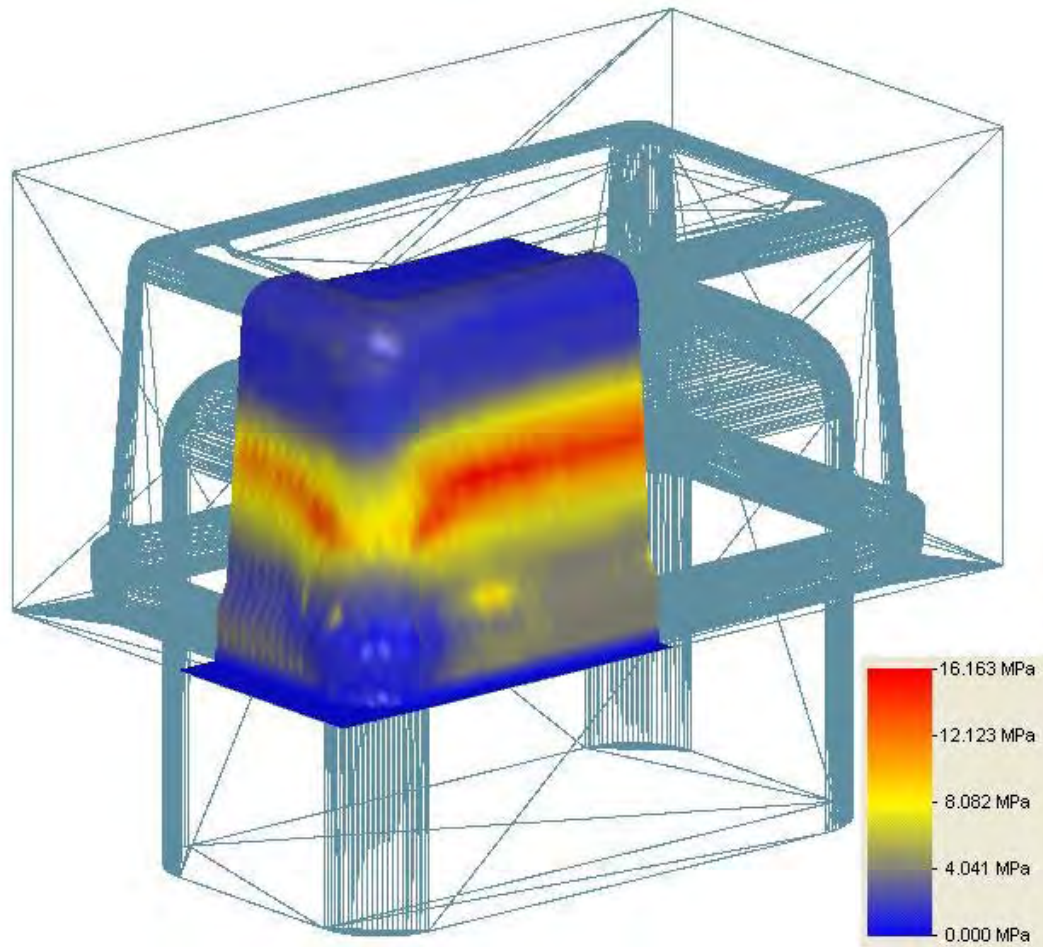
Para poder ver la dependencia de la forma del plug en la simulación del proceso de termoformación, se simuló el proceso variando con respecto al plug original el valor del radio de curvatura a 17 mm como se muestra en la figura 75.

Figura 75. Radio del plug para la simulación 1.



En cuanto a la distribución de esfuerzos residuales, se nota que se encuentran localizados en la misma parte, mas sin embargo, al comparar los dos resultados, se ven mayores zonas en el producto afectadas con esfuerzos residuales como se nota en la figura 76.

Figura 76. Esfuerzos residuales para radio del plug de 17 mm.



Distribución de espesores. Al tener el plug un radio menor tendrá un menor área de contacto con la lámina, por tal razón se presenta una menor zona de acumulamiento de material en el producto, la cual está distribuida entre la zona media y la parte inferior del producto. En la figura 77 se puede observar que el acumulamiento del material se presenta mas hacia la zona media del producto.

Figura 77. Distribución de espesores para radio del plug de 17 mm.

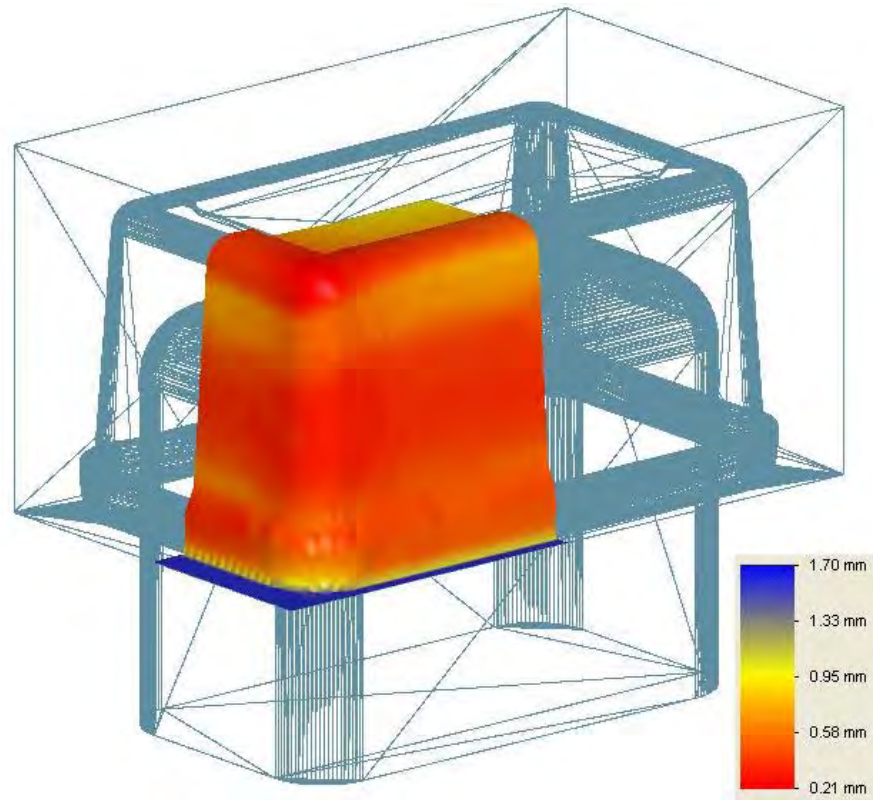


Figura 78. Distribución de espesores en $X = 0$ para radio del plug de 17 mm.

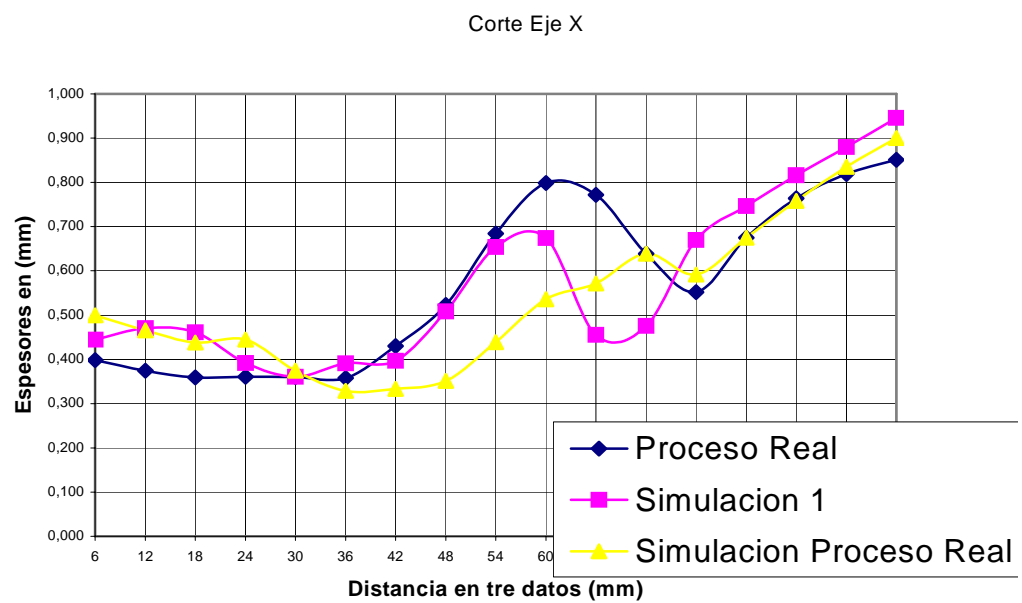


Figura 79. Distribución de espesores en $Y = 0$ para radio del plug de 17 mm.

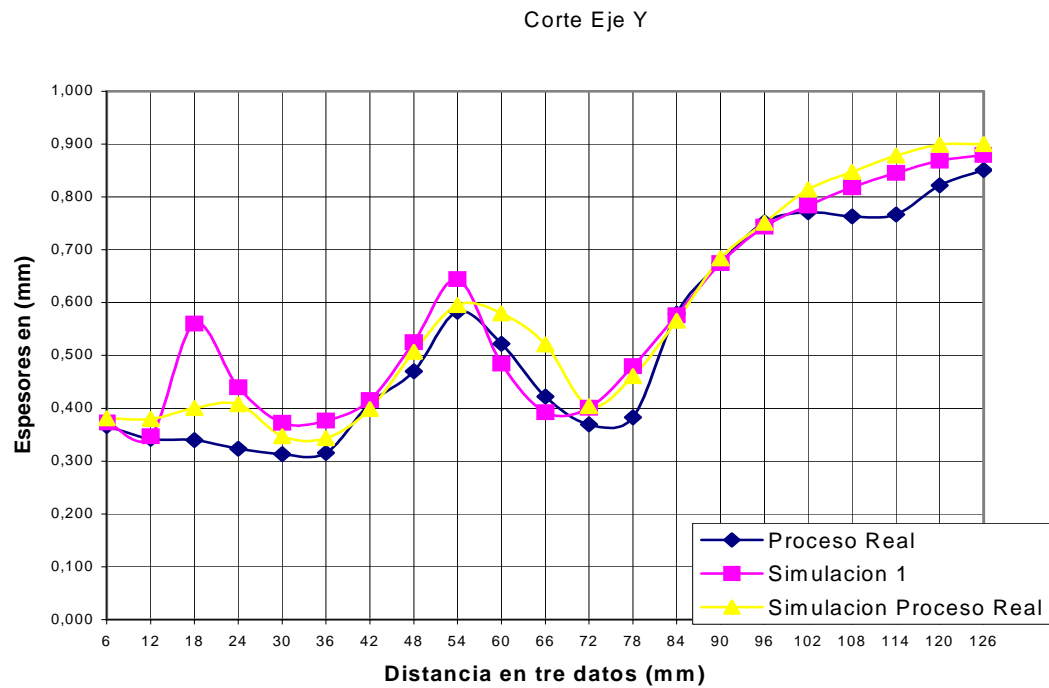
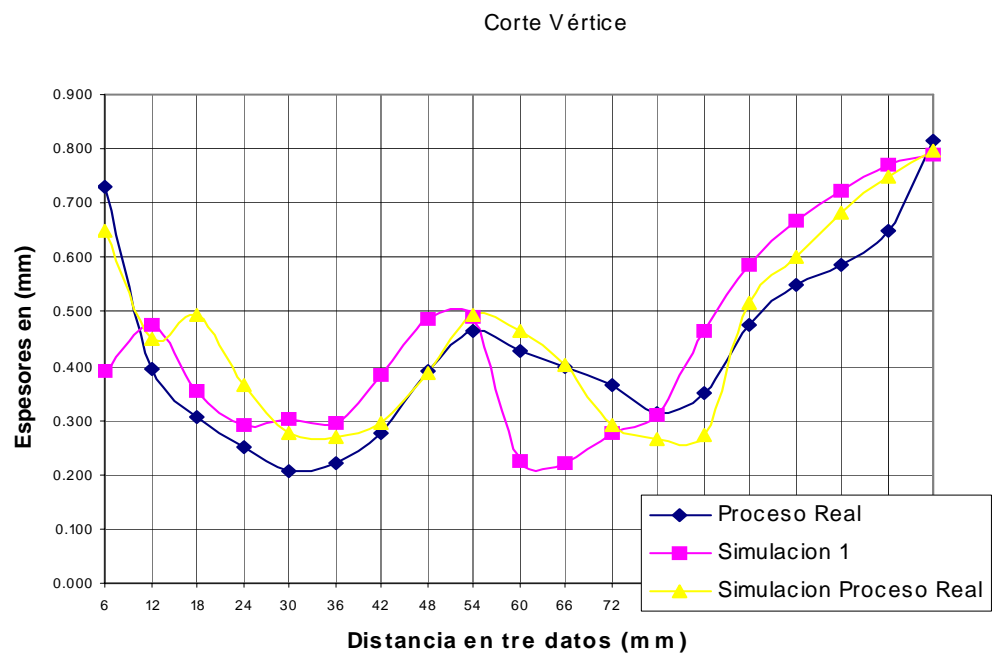


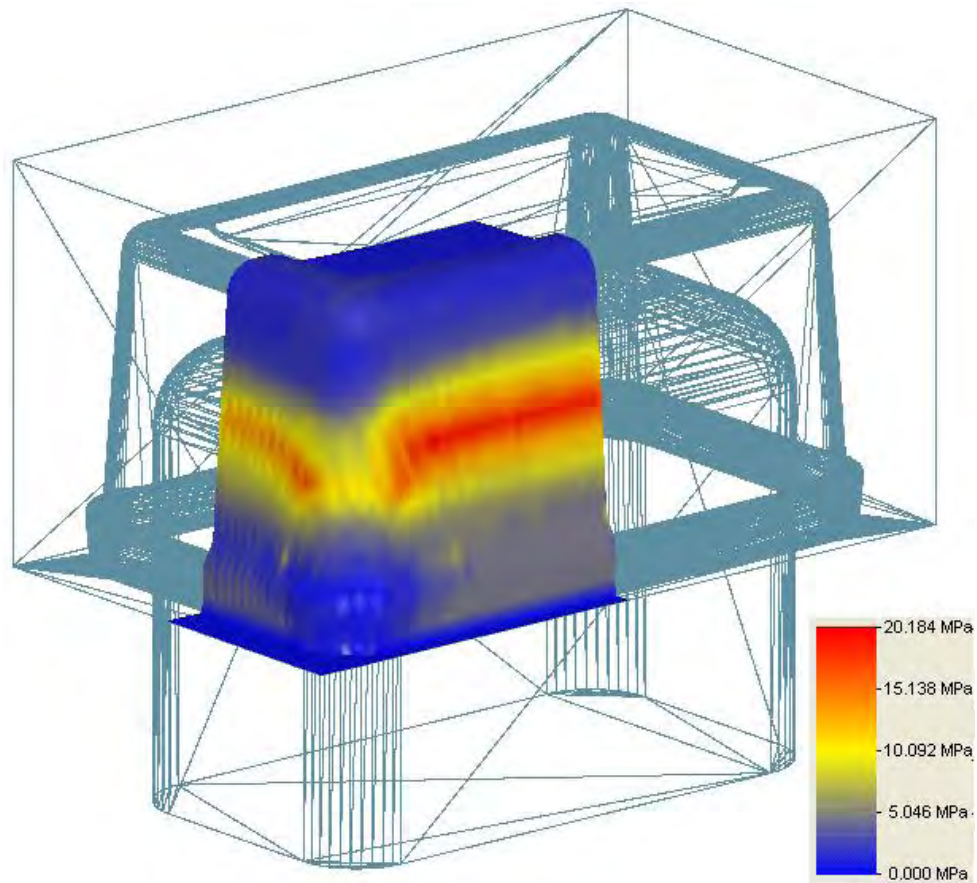
Figura 80. Distribución de espesores en el vértice para radio del plug de 17 mm.



9.11 TIEMPO DE DESCENSO DEL PLUG

Para analizar la influencia del tiempo de descenso del plug, se simuló el proceso de termoformación de la base rectangular disminuyendo la velocidad de descenso del plug. Como resultado se obtuvo un producto con mayores esfuerzos residuales como se muestra en la figura 81. La causa de la generación de esfuerzos residuales mayores es que al ser mayor el tiempo de descenso del plug, la lámina perderá mas calor en el proceso y como ya se ha establecido los esfuerzos residuales en el producto son dependientes de la temperatura a la que se encuentra la lámina.

Figura 81. Esfuerzos residuales tiempo de descenso del plug de 140 ms.



Distribución de espesores. Como resultado del retraso del plug, la lámina perdió calor dando como resultado un proceso de termoformación con temperatura de lámina menor, lo cual causa que el plug arrastre mas material hacia el fondo de la base rectangular 500 g.. Dicho resultado puede ser verificado analizando las gráficas de la distribución de espesores tomadas en los tres cortes

Figura 82. Distribución de espesores tiempo de descenso del plug de 140 ms

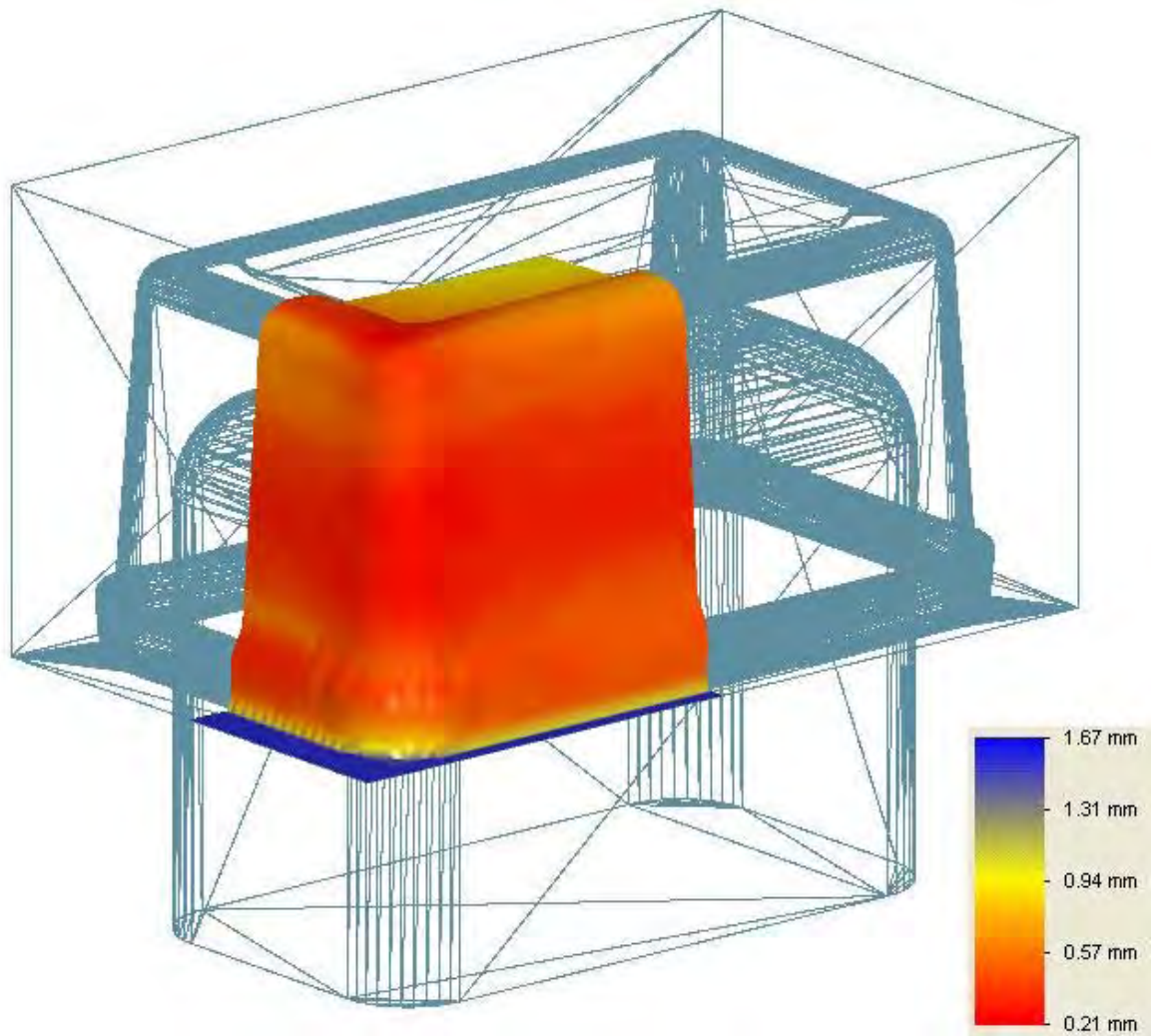


Figura 83. Distribución de espesores en $X = 0$ para tiempo descenso del plug de 140 ms.

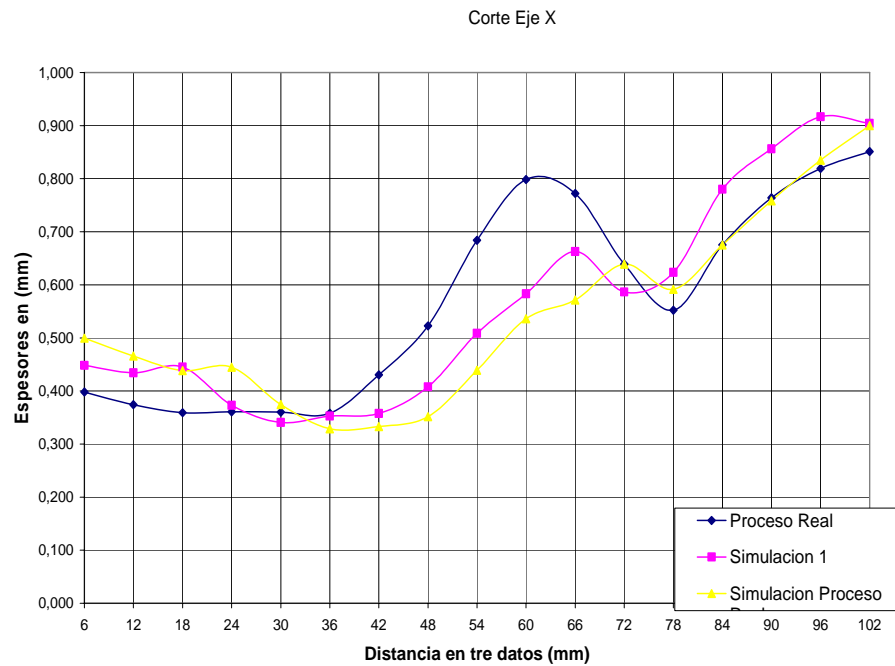


Figura 84. Distribución de espesores en $Y = 0$ para tiempo descenso del plug de 140 ms.

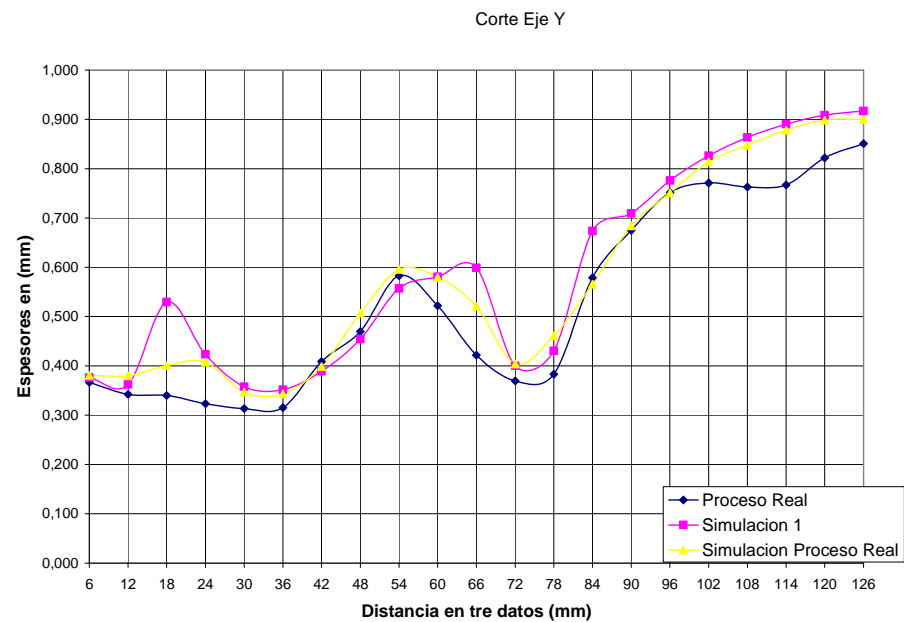
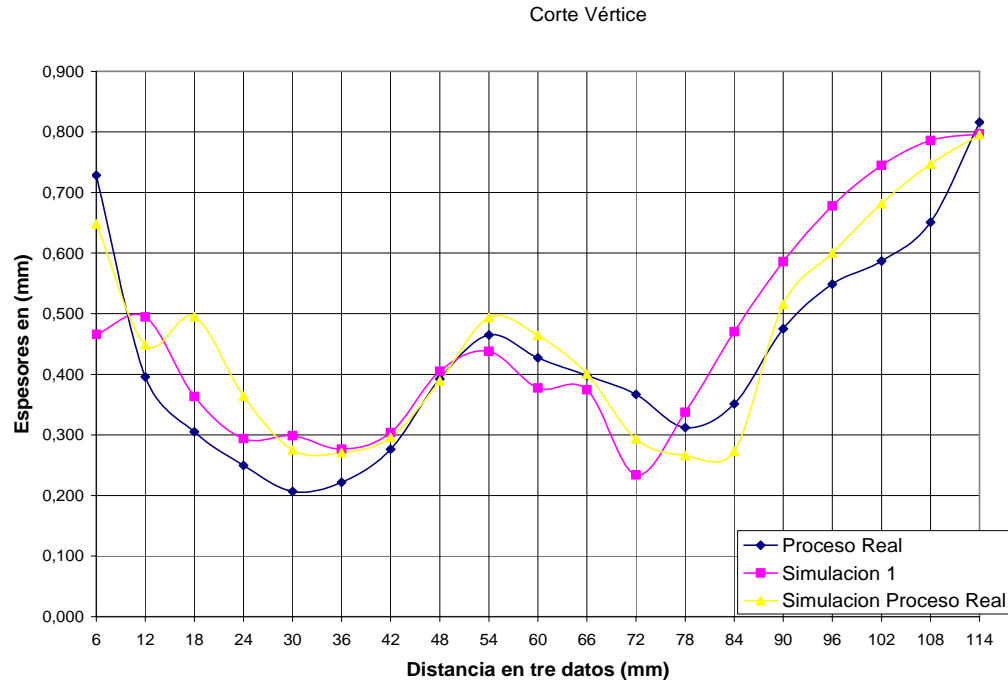


Figura 85. Distribución de espesores en el vértice para tiempo descenso del plug de 140 ms.

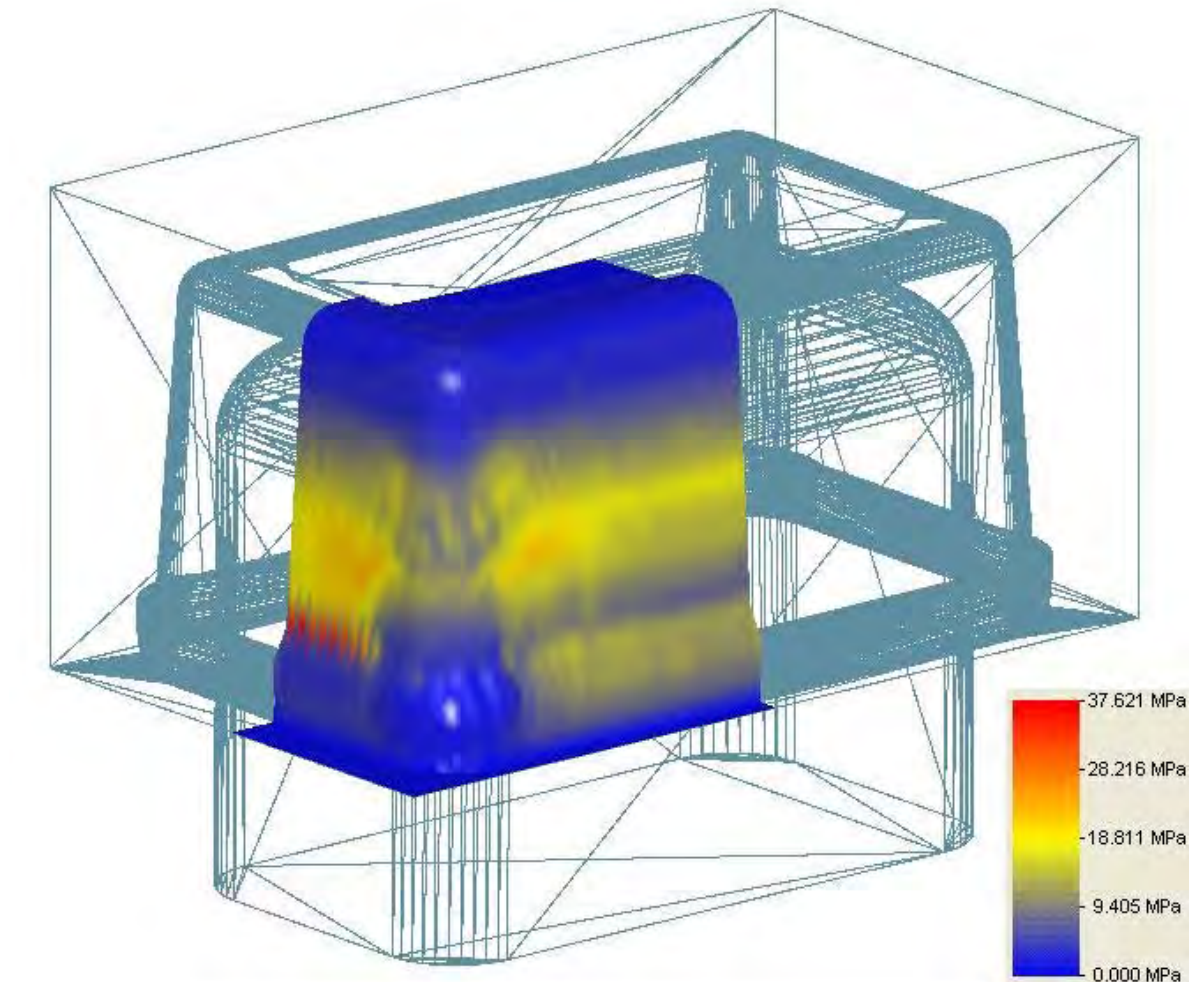


9.12 RECORRIDO DEL PLUG

El recorrido del plug determina la distancia en la que actuará el plug haciendo el estiramiento de la lámina antes que entre el aire de formado y determine cual será la distribución final de los espesores en el producto final. Para encontrar la influencia de la distancia recorrida por el plug se realizó una simulación aumentando el recorrido en 10 mm.

Analizando los datos de la simulación se encuentra que al ser mayor el recorrido del plug, se presenta una mayor generación de esfuerzos, ya que el plug ejerce la fuerza sobre la lámina para lograr estirla por mas tiempo, lo cual causa que se creen mayores esfuerzos residuales en el producto final, tal como se muestra la figura 86.

Figura 86. Esfuerzos residuales recorrido del plug 56 mm.



Distribución de espesores. En cuanto a la distribución de espesores generada por la simulación del proceso de termoformación de la base rectangular 500 g., aumentando el recorrido del plug se puede ver que el acumulamiento que se presentó cuando se simuló el proceso real ya no se presenta de forma tan marcada en la parte inferior de la base rectangular 500 g., ya que al aumentar el recorrido del plug, éste arrastra el material mas hacia el fondo, y cuando entra el aire de formado, la parte de la lámina que se encuentra en contacto con el plug va al fondo del producto, tal como se ve en las gráficas de los cortes en donde el fondo del material es mucho mas grueso.

Figura 87. Distribución de espesores recorrido del plug 56 mm.

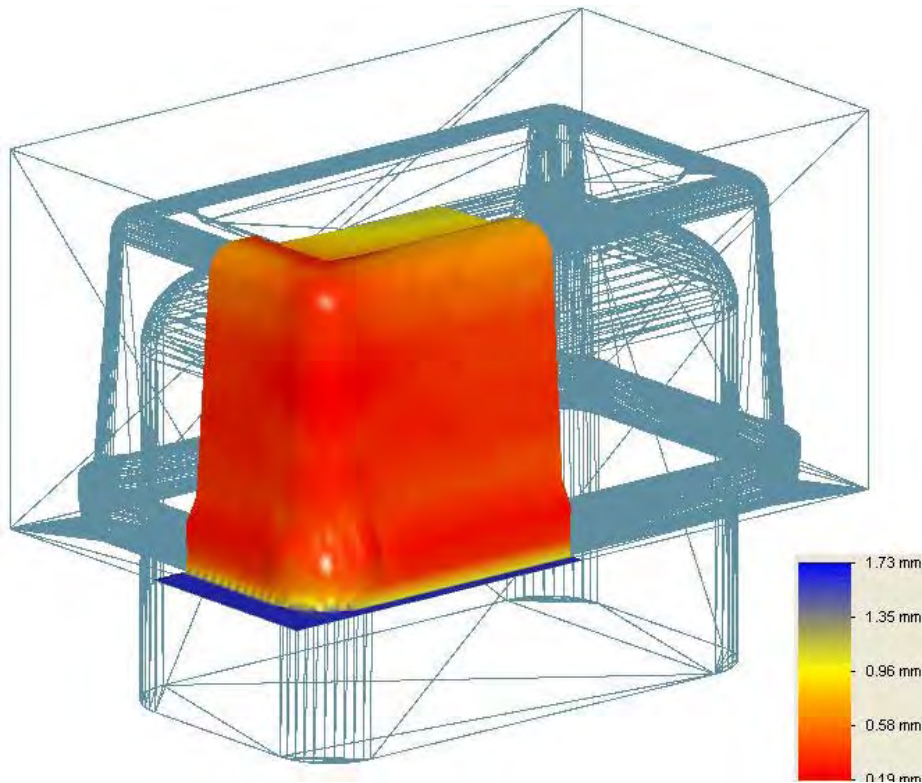


Figura 88. Distribución de espesores en $X = 0$ recorrido del plug 56 mm.

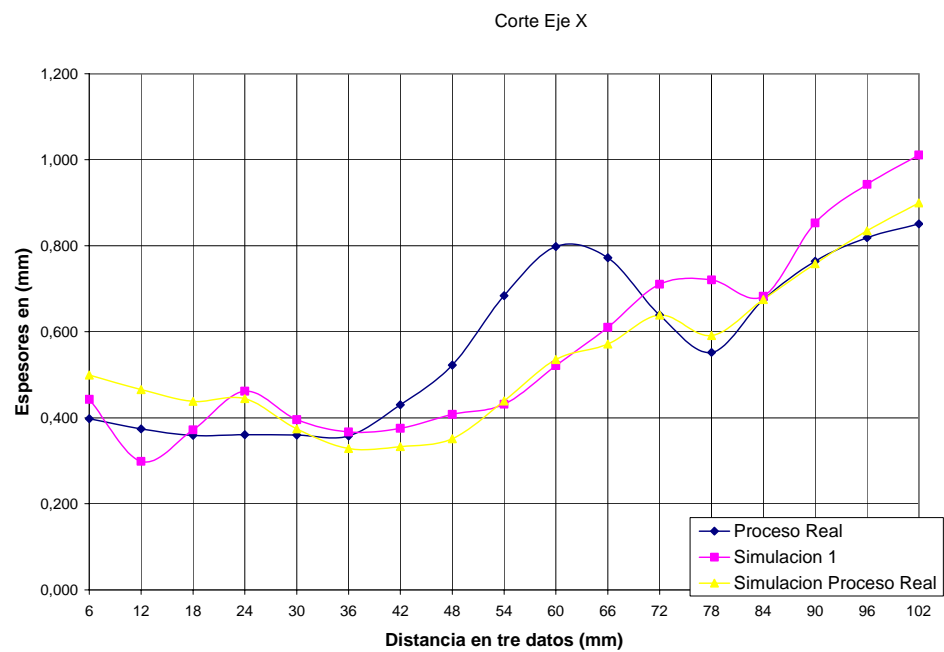


Figura 89. Distribución de espesores en $Y = 0$ recorrido del plug 56 mm.

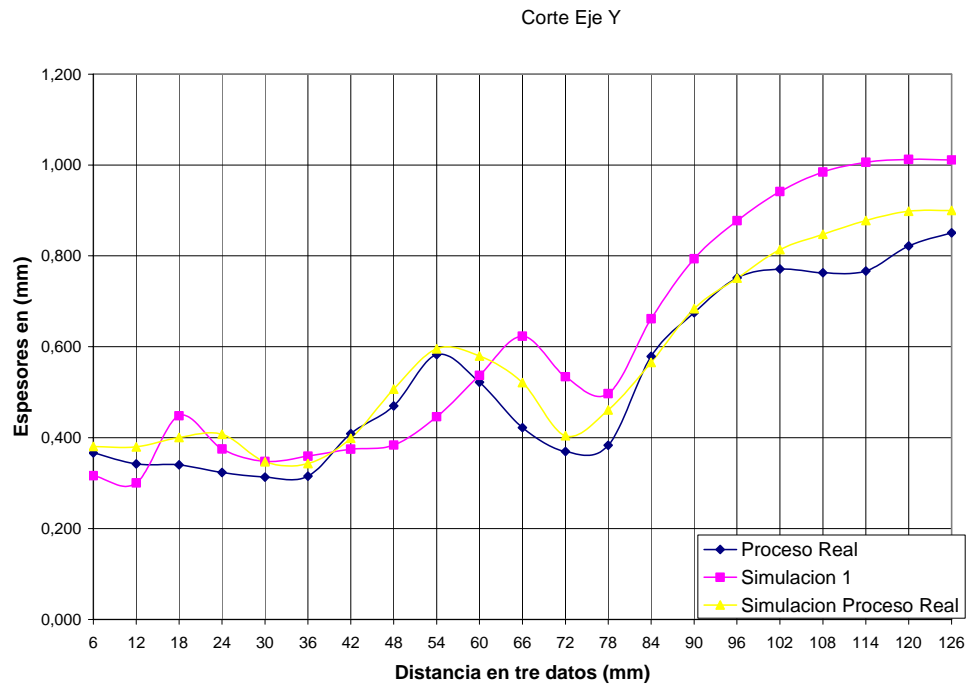
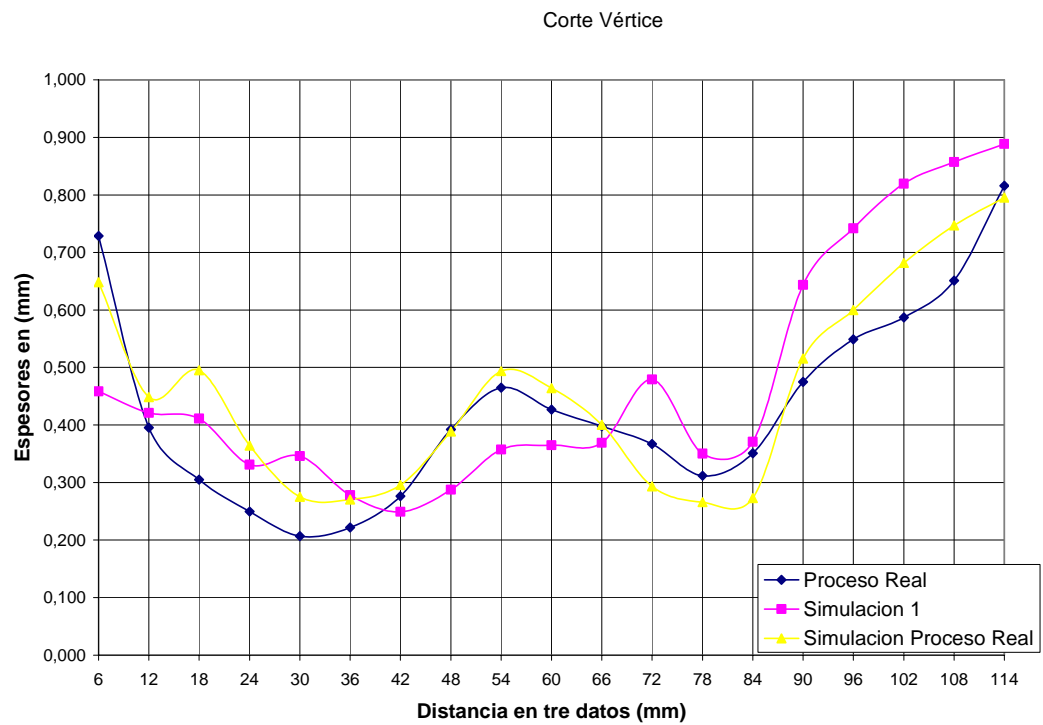


Figura 90. Distribución de espesores en el vértice recorrido del plug 56 mm.



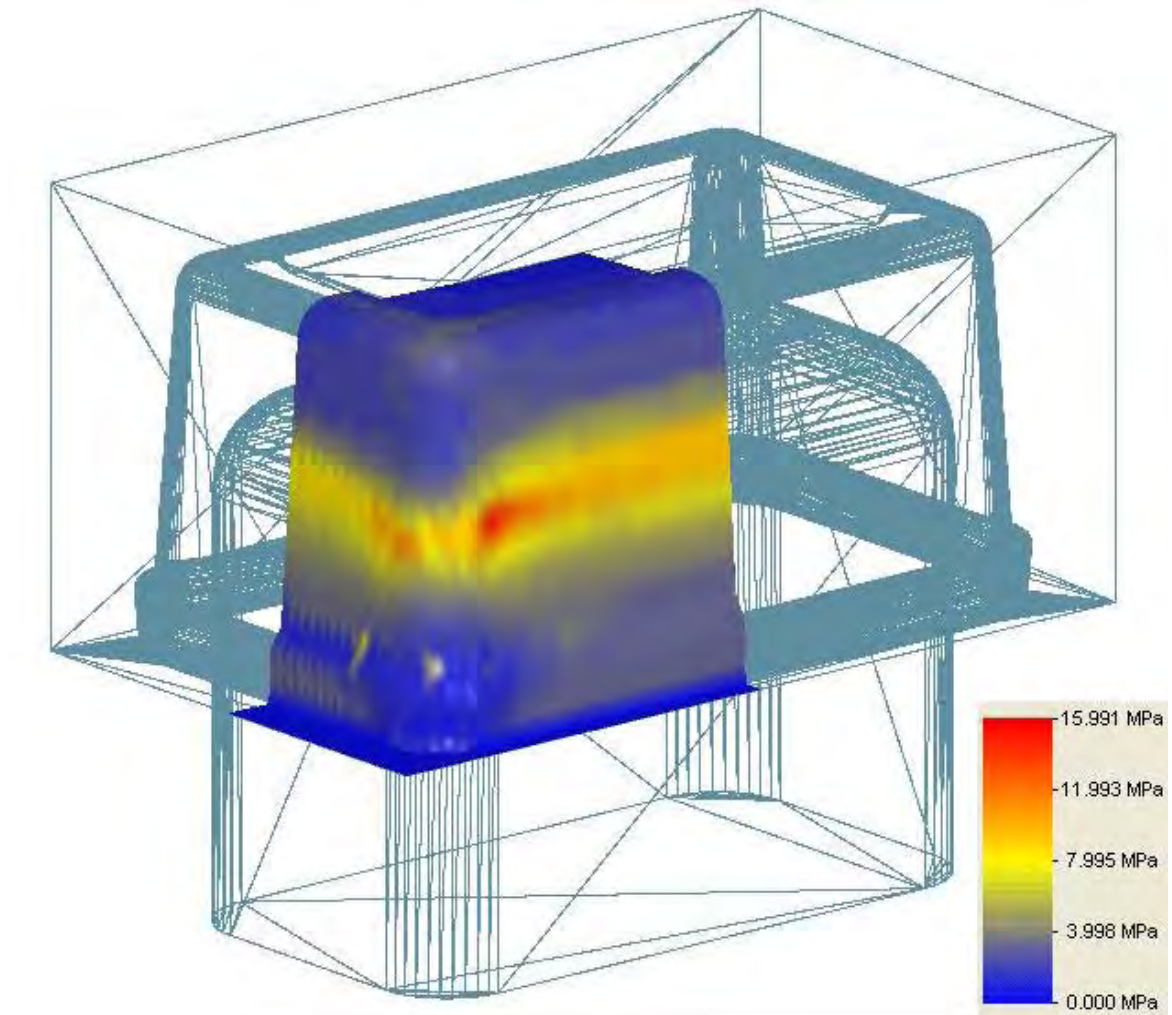
9.13 TIEMPO DE DURACIÓN DEL AIRE DE FORMADO

La acción del tiempo del aire de formado en el proceso de termoformación de la base rectangular influye tanto en el formado como en el enfriamiento del producto, pero el software T-SIM utiliza 2 módulos diferentes para simular cada una de estas fases del proceso. El desarrollo de este trabajo se centro solo en la parte de la simulación de la fase de formado del proceso.

La duración del aire de formado en la fase de formado del producto determina el tiempo necesario para que la lámina se adhiera totalmente a la cavidad. Se realizaron 2 simulaciones para analizar la influencia del tiempo del aire de formado. Al simular el proceso de termoformado aumentando el valor del aire de formado calculado para la simulación de proceso real, se obtuvo una simulación errónea por exceso de tiempo, en donde la simulación quedo incompleta. Para la otra simulación se bajó el valor del tiempo del aire de formado a 500 ms obteniendo los siguientes resultados:

Esfuerzos. En cuanto a la distribución esfuerzos residuales no hay diferencia considerable entre los datos obtenidos en esta simulación y los obtenidos en la simulación del proceso real, tal como se ve en la figura 91.

Figura 91. Esfuerzos residuales duración tiempo aire de formado 500 ms.



Distribución de espesores. En cuanto a la distribución de espesores, se presenta una diferencia entre los resultados obtenidos en la simulación del proceso real y los obtenidos en la simulación variando el tiempo del aire de formado, la cual se presenta debido a que el aire de formado es el que termina de estirar la lámina y se encarga de adherirla a las paredes de la cavidad. La diferencia en el tiempo de acción del aire produce la variación que se presenta entre las dos simulaciones en cuanto a la distribución de espesores tal como se ve en las gráficas de los cortes.

Figura 92. Distribución de espesores en $X = 0$ tiempo de aire de formado 500 ms.

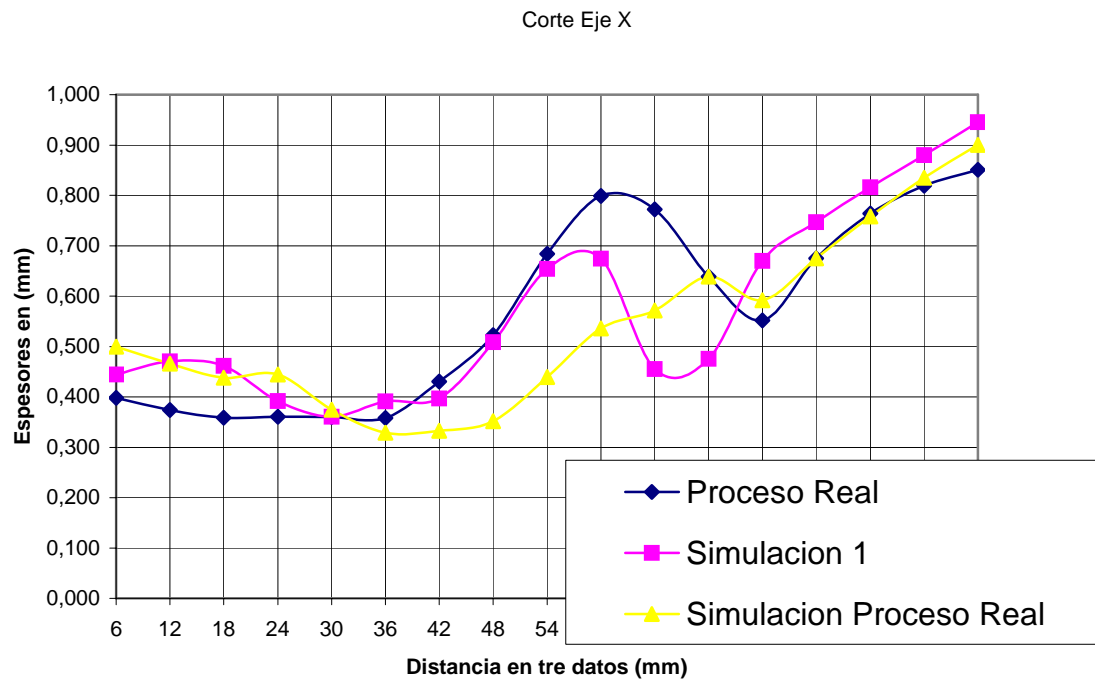


Figura 93. Distribución de espesores en $Y = 0$ tiempo de aire de formado 500 ms.

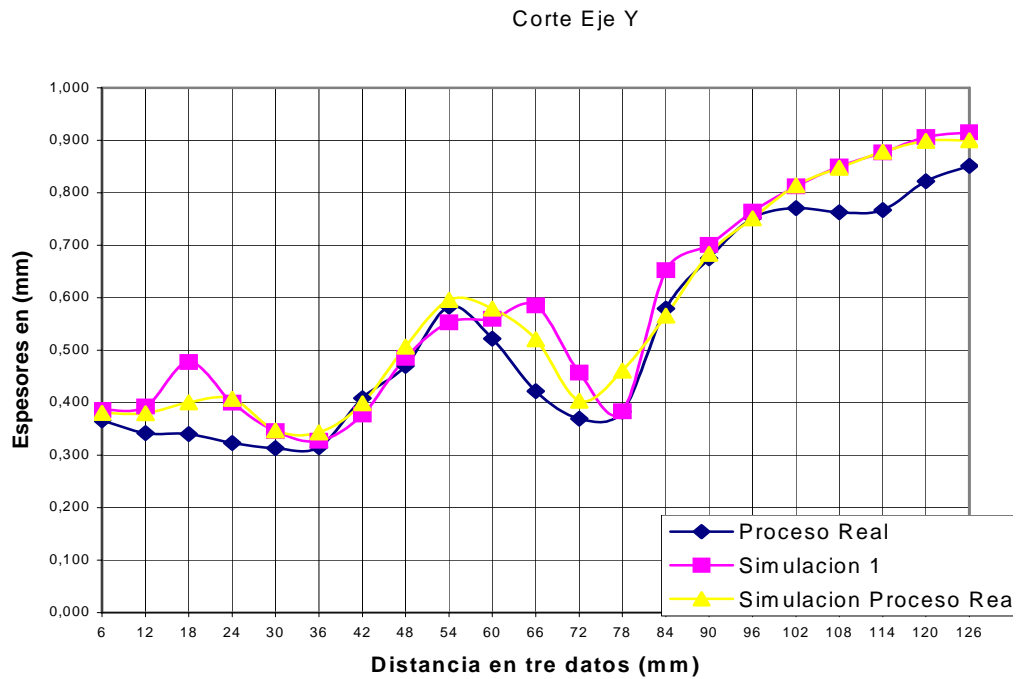
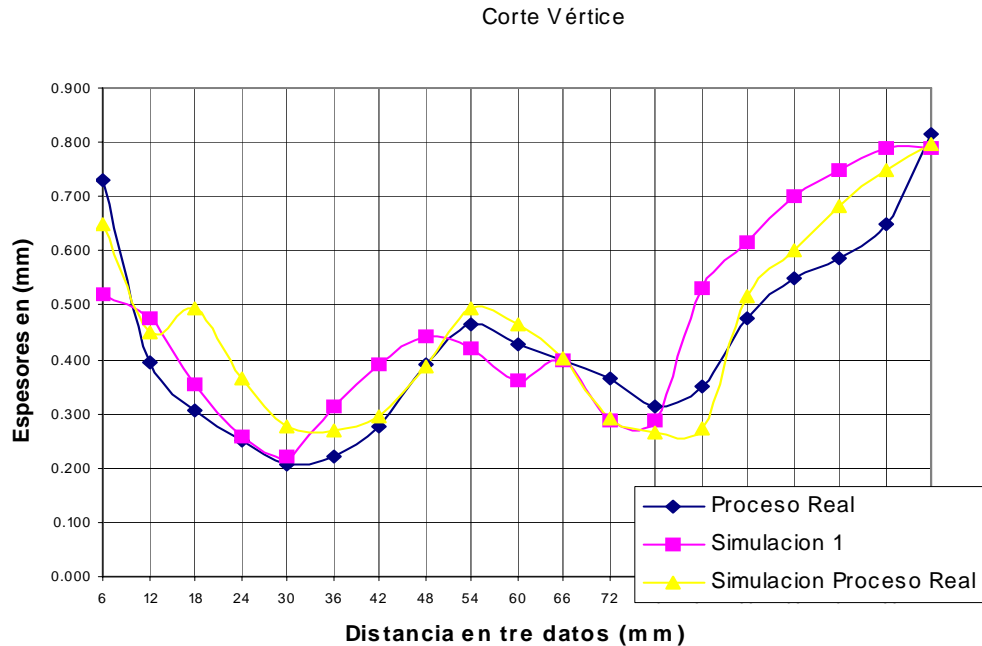


Figura 94. Distribución de espesores en el vértice tiempo de aire de formado 500 ms.



9.14 ALTURA DEL SENSOR

Como ya se definió anteriormente, este parámetro de proceso es una configuración de la máquina termoformadora, el cual me determina el momento exacto en donde entra el aire de formado.

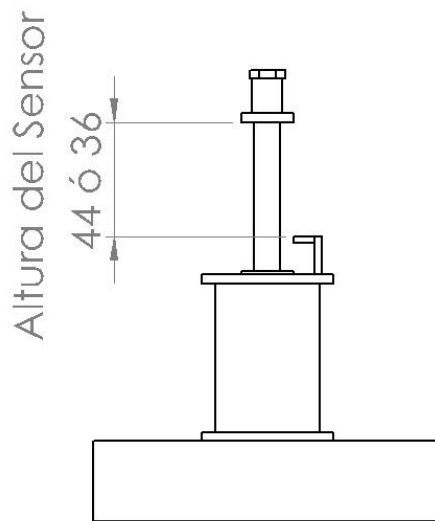
En al ambiente industrial variar este parámetro se conoce como adelantar (subir el sensor) y atrasar el aire de formado (bajar el aire de formado), en donde sus efectos son los siguientes:

Al subir el sensor el aire de formado entra antes de que el plug termine su recorrido, logrando adicionar mas material a las paredes medias del producto. Por el contrario, el hecho de bajar el sensor determina que el aire de formado entre

cuando el plug está completando su recorrido, consiguiendo así que la lámina sea arrastrada hacia el fondo del producto, obteniendo mas firmeza en el fondo.

Se efectuaron 2 simulaciones usando como valor de altura de sensor 36 mm (simulación 1) y 44 mm (simulación 2), medidos desde el punto 0 del recorrido del plug como se muestra en la figura 95.

Figura 95. Configuración de la altura del sensor.



Esfuerzos residuales. Como se explicaba anteriormente el hecho de tener una menor altura de sensor determina que hay un menor recorrido del plug sin que entre el aire de formado. En el mismo orden de ideas, si se tiene una mayor altura de sensor se tendrá un mayor recorrido del plug sin la acción del aire de formado. Por esta razón se pueden obtener efectos iguales o parecidos a los que se obtienen si se aumenta o se disminuye el recorrido del plug.

Cuando el sensor se encuentra a un mayor altura se presentan menos esfuerzos residuales que cuando la altura del sensor es menor. Esta deferencia es notable al analizar los resultados de las dos simulaciones en las figuras 96 y 97.

Figura 96. Esfuerzos residuales altura sensor 36 mm.

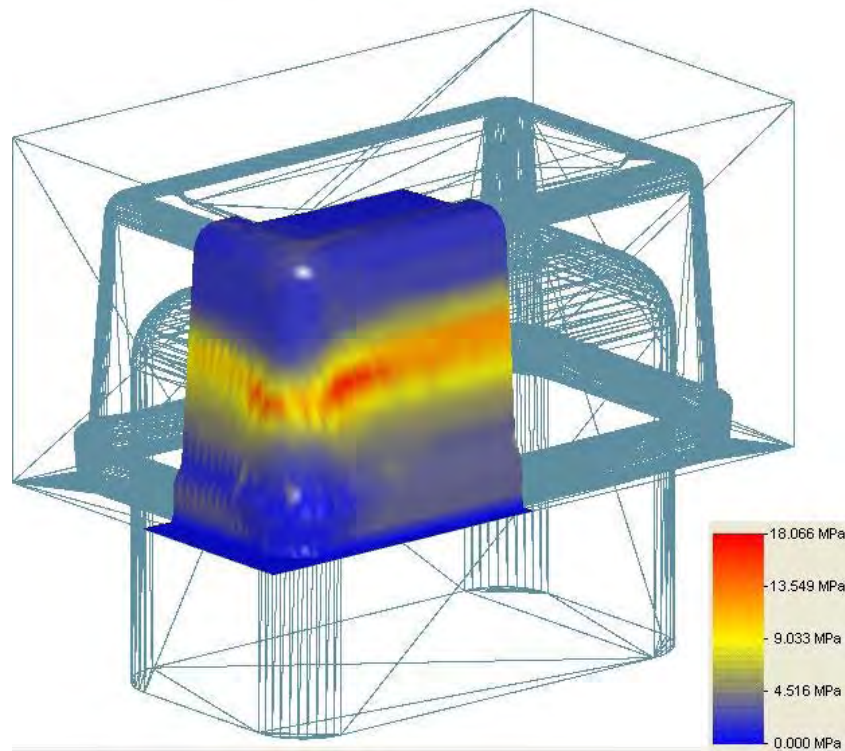
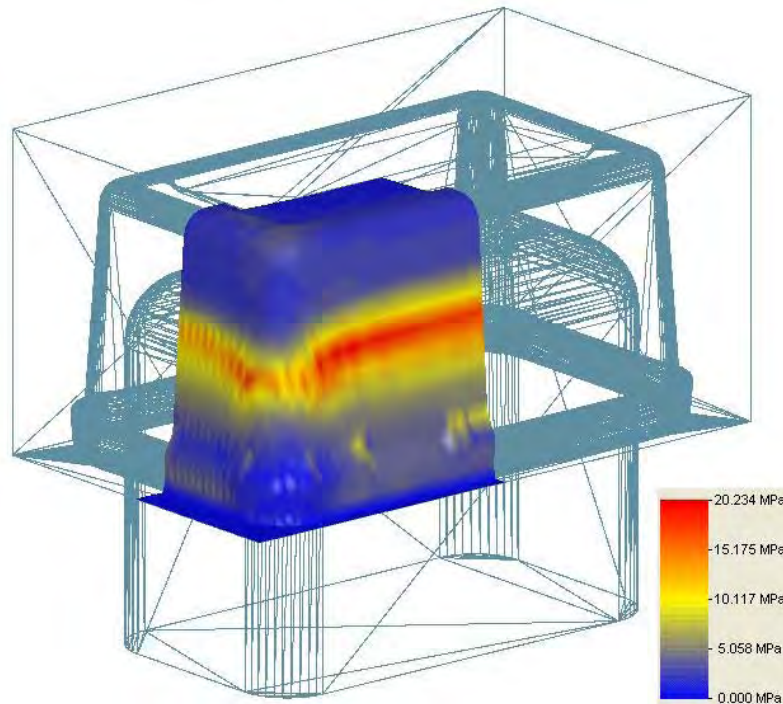


Figura 97. Esfuerzos residuales altura sensor 44 mm.



Distribución de espesores. Cuando se tiene una menor altura de sensor se obtendrá una mejor distribución de material alrededor de las paredes medias del producto, por el contrario cuando se tiene una mayor altura de sensor se obtendrá un producto con mas peso y con una concentración de material en el fondo, lo cual puede ser beneficioso si se requiere un producto con firmeza en el fondo.

Figura 98. Distribución de espesores altura sensor 36 mm.

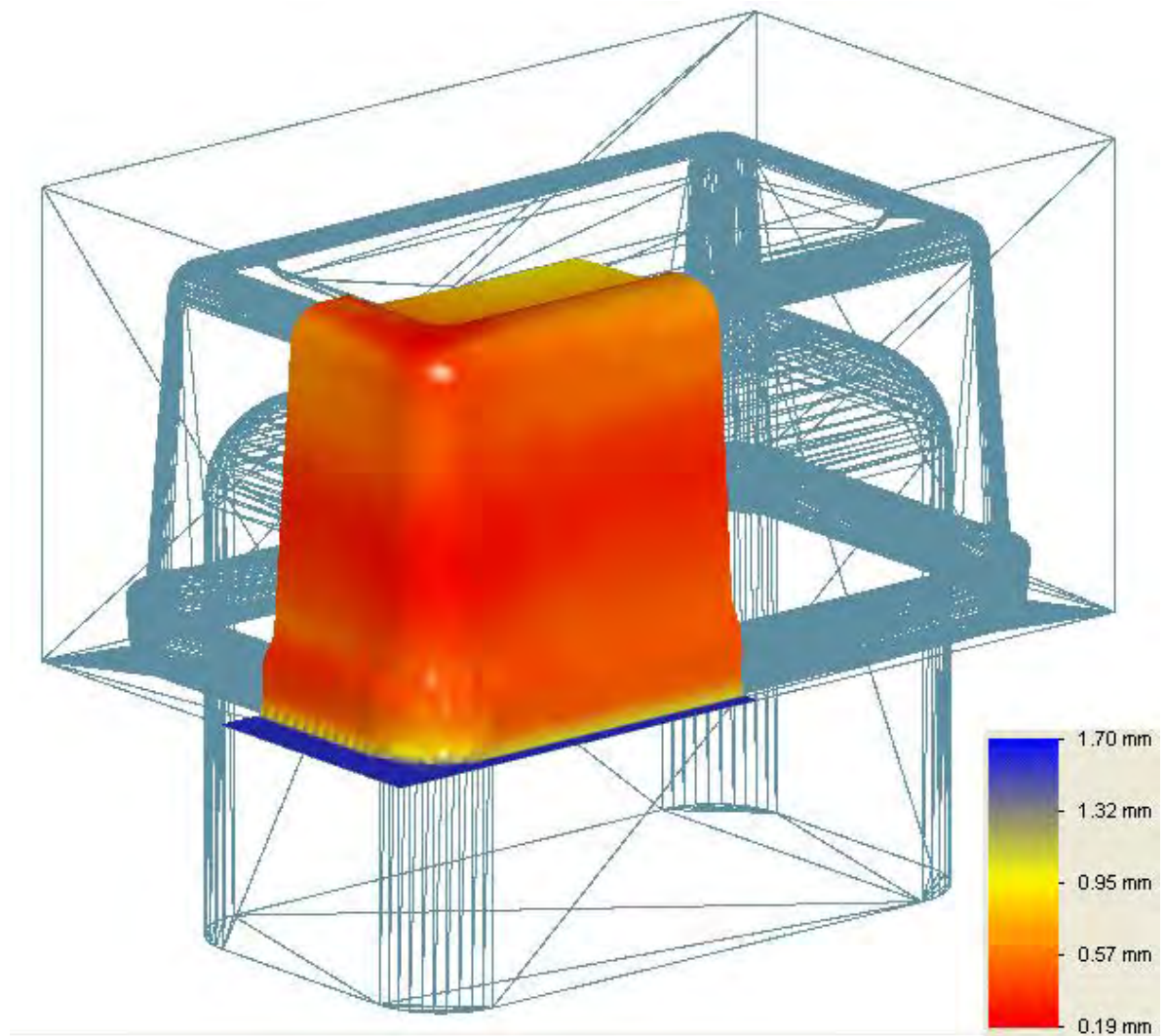


Figura 99. Distribución de espesores altura sensor 44 mm.

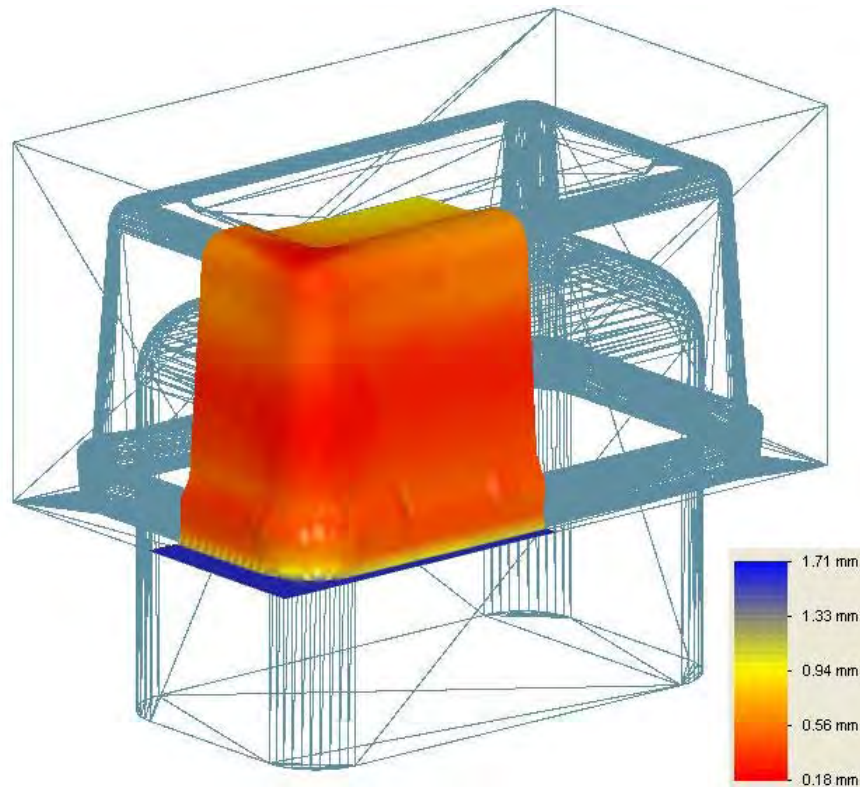


Figura 100. Distribución de espesores en $X = 0$ altura sensor.

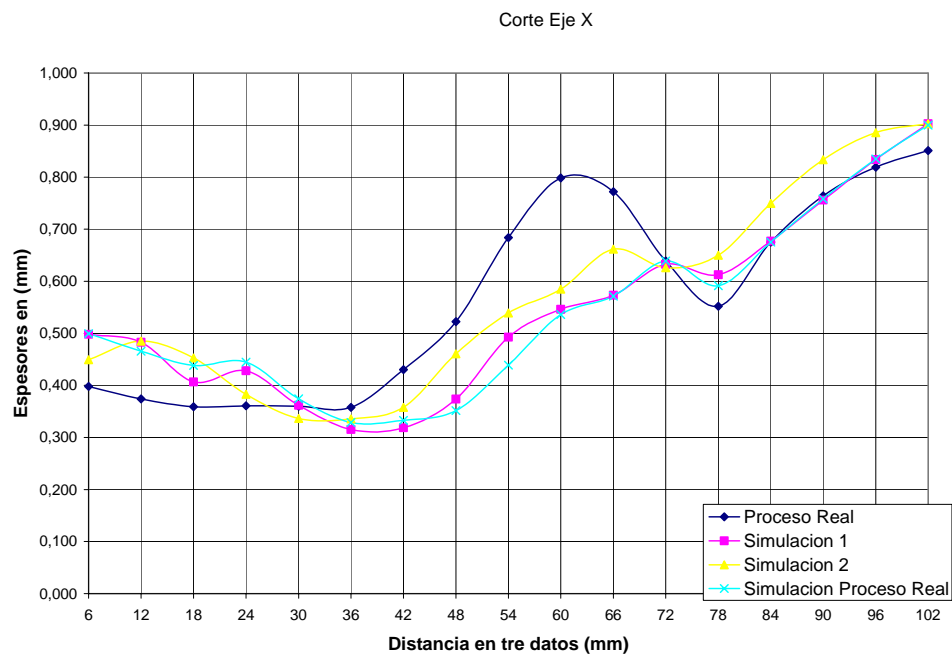


Figura 101. Distribución de espesores en $Y = 0$ altura sensor.

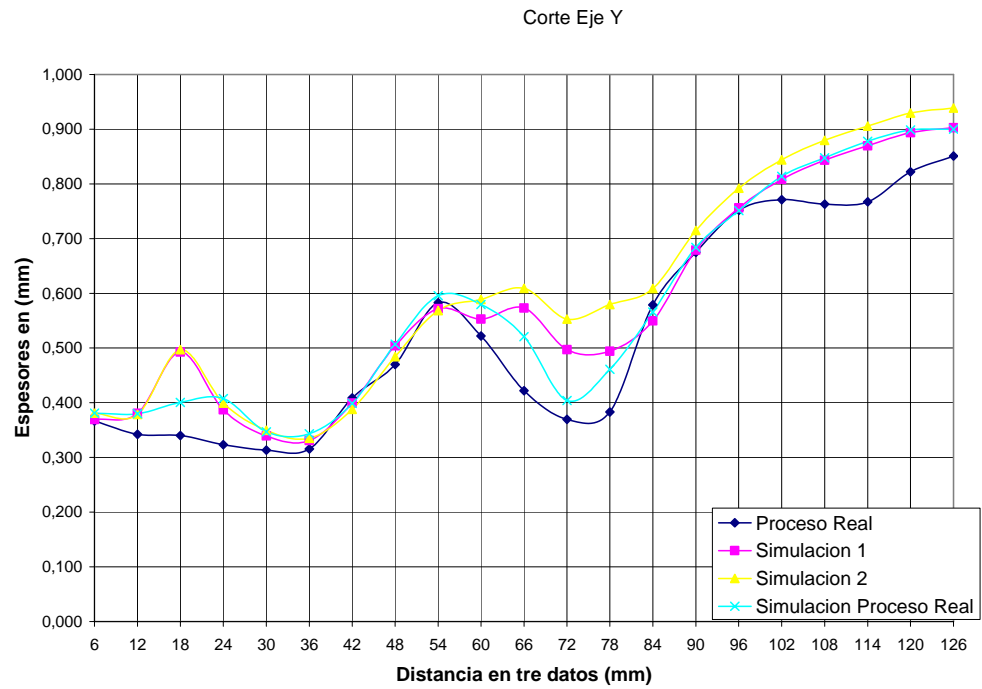
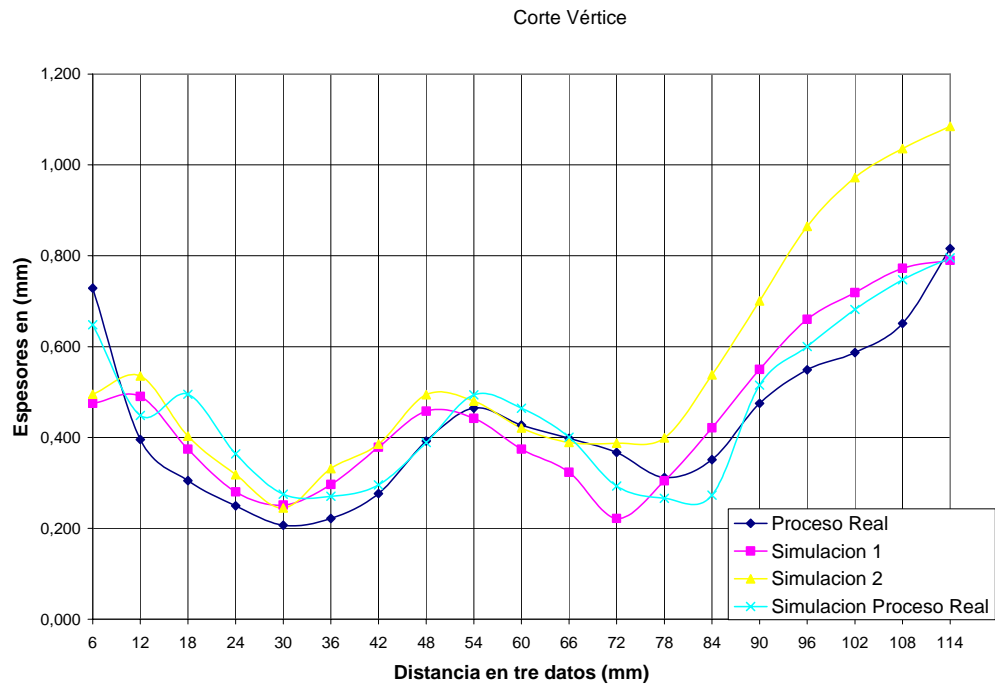


Figura 102. Distribución de espesores en el vértice altura sensor.

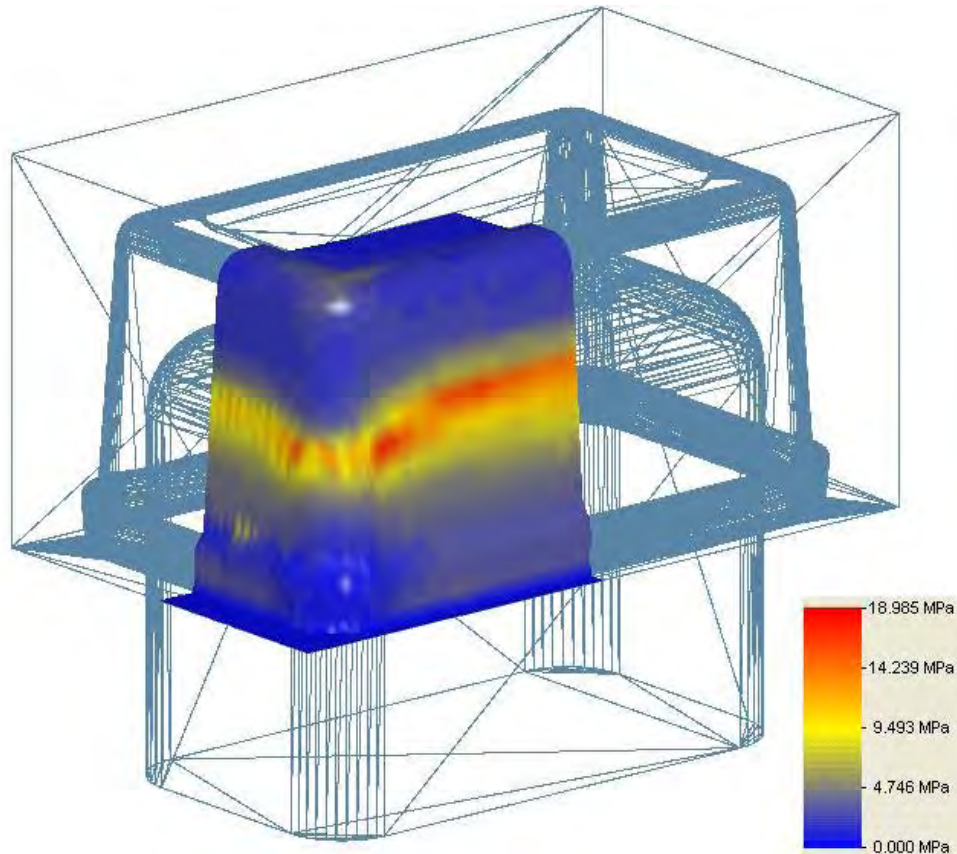


9.15 COEFICIENTE DE FRICCIÓN PLUG-LÁMINA

Como se explicaba anteriormente el coeficiente de fricción es una variable del proceso determinada por el material con el que es fabricado el plug y por la rugosidad superficial que con la que quede el plug después de fabricado, la fricción es una variable dependiente de la temperatura por eso entre mas caliente esté la lámina mayor será la resistencia que se cree entre el plug y la lámina.

Para encontrar la influencia de la variable de proceso fricción entre el plug y lámina se simuló el proceso disminuyendo el valor de la fricción medida en el capítulo 7 a 0.5, de la cual se puede ver que los esfuerzos residuales se mantienen casi constantes a los encontrados en la simulación del proceso real.

Figura 103. Esfuerzos residuales Coef. Fricción plug-lámina 0.5.



Distribución de espesores. Al simular el proceso con un valor de fricción menor entre el plug y la lámina se puede ver en los perfiles de espesores que no existe un acumulamiento tan marcado como el que se presenta con la simulación real, ya que si la fricción entre el plug y la lámina es menor, ésta desliza con mayor facilidad a medida que el plug desciende, contrario a lo que sucede con la simulación del proceso real donde la lámina no desliza lo suficiente con respecto al plug y éste arrastra la lámina adelgazando las paredes del medio de la base rectangular 500 g..

Figura 104. Distribución de espesores Coef. Fricción plug-lámina 0.5.

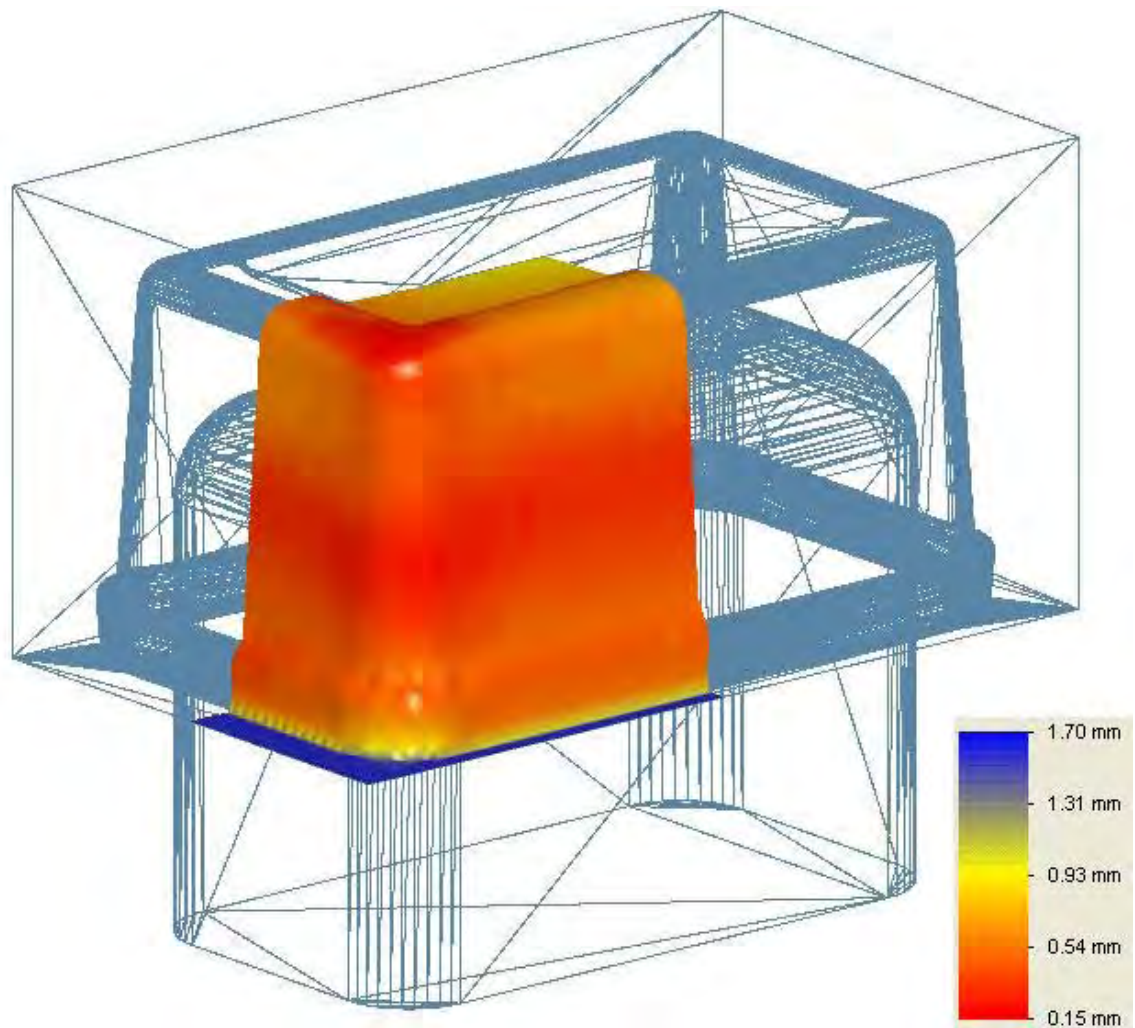


Figura 105. Distribución de espesores en $X = 0$ Coef. Fricción plug-lámina 0.5.

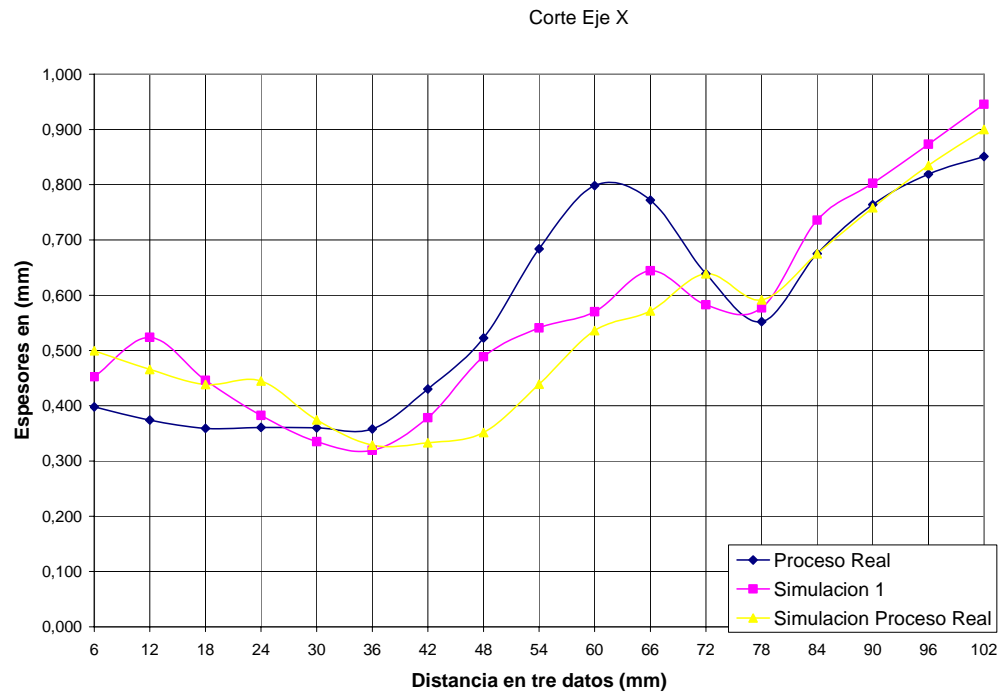


Figura 106. Distribución de espesores en $Y = 0$ Coef. Fricción plug-lámina 0.5.

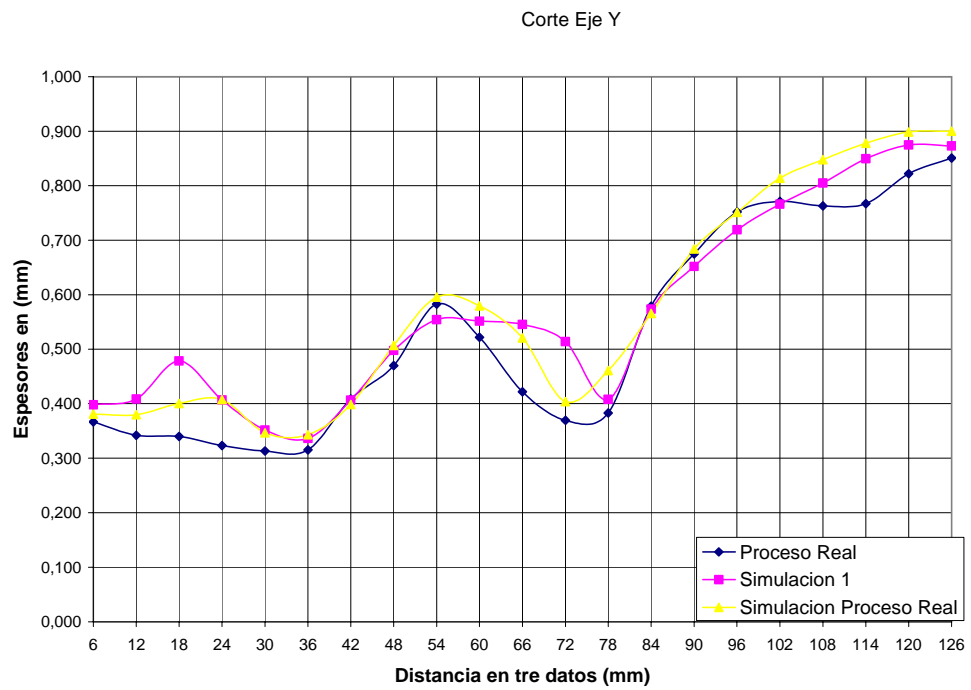
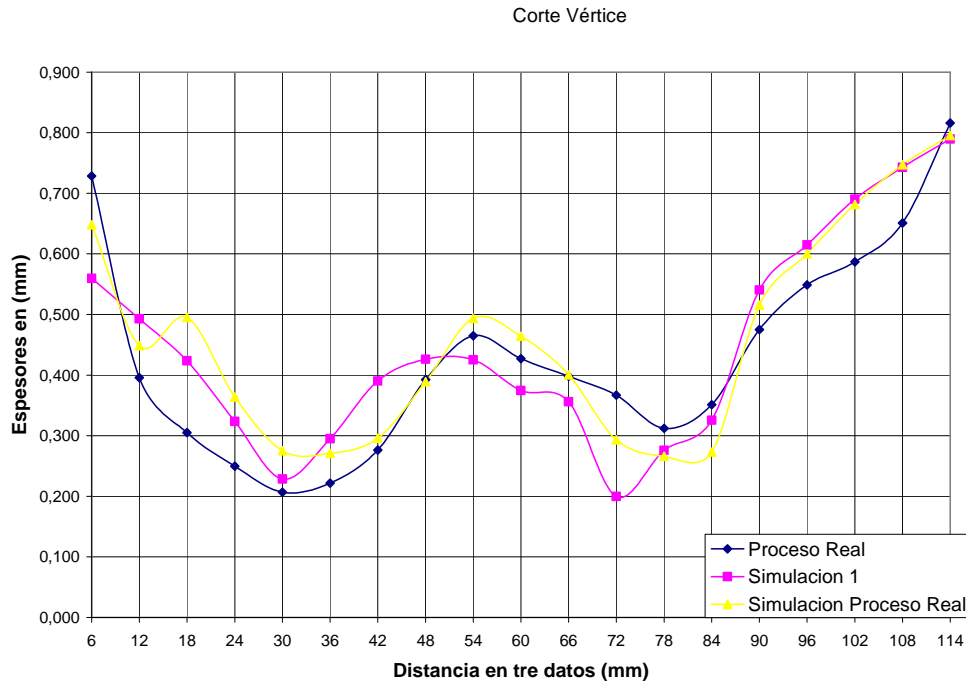


Figura 107. Distribución de espesores en el vértice Coef. Fricción plug-lámina 0.5.



9.16 COEFICIENTE DE FRICCIÓN CAVIDAD-LÁMINA

Al igual que todos los demás parámetros de proceso que tienen que ver con la cavidad, el coeficiente de fricción entre la cavidad y la lámina no presenta mayor incidencia en los resultados finales de la simulación del proceso de termoformación de la base rectangular 500 g..

Esto se debe a que durante el estiramiento que le hace el plug a la lámina, no se presenta ningún roce entre la lámina y la cavidad. Por el contrario, el coeficiente de fricción si influye en el momento en el que entra el aire de formado y comienza a pegar la lámina contra las paredes, pues en este momento si hay rozamiento entre las paredes de la cavidad y la lámina. Por esta razón el producto puede tener una mayor generación de esfuerzos residuales en el producto, tal como se

ve en los resultados de las 2 simulaciones realizadas, con 0.3 (simulación 1) y 0.7 (simulación 2) de COF entre la lámina y el plug

Figura 108. Esfuerzos residuales COF lámina-plug 0.3.

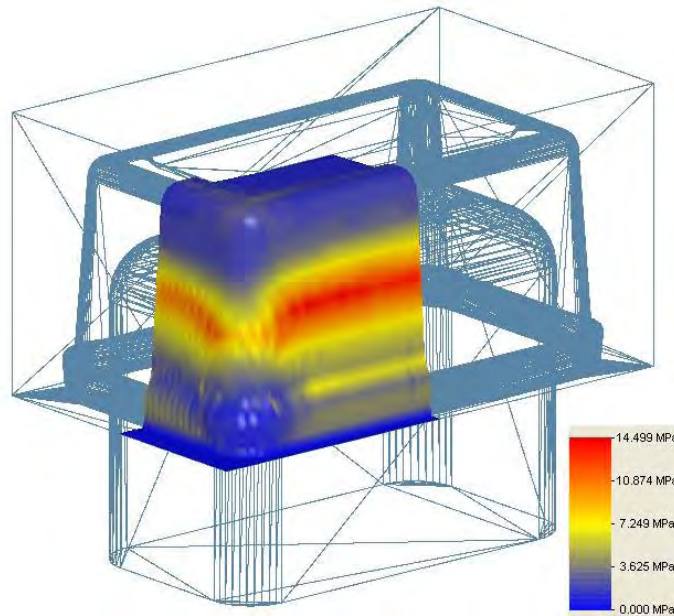
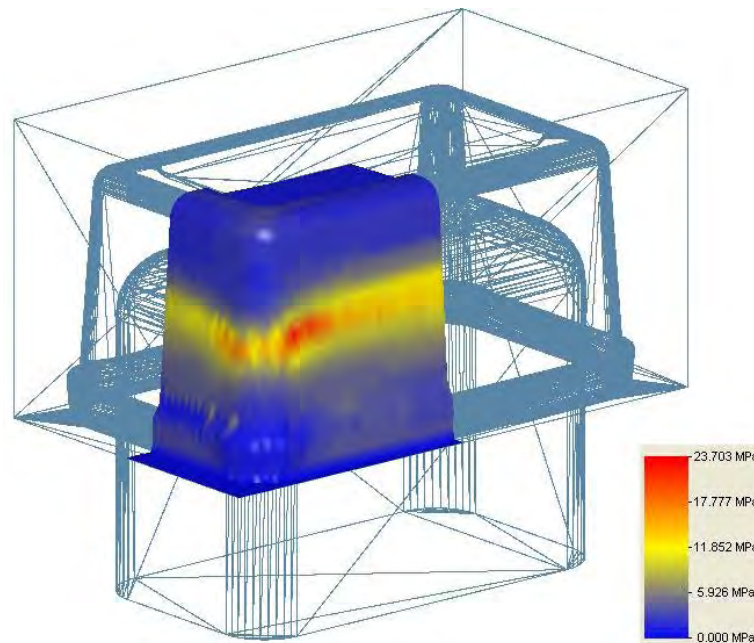


Figura 109. Esfuerzos residuales COF lámina-plug 0.7



Distribución de espesores. Si se presentará un roce entre la lámina y la cavidad durante el proceso de estiramiento realizado por el plug, se generaría un acumulamiento de material en alguna zona del producto, pero como éste no es el caso, la diferencia entre los valores de la simulaciones realizadas con los dos coeficientes distintos no presentan mayor variación en la distribución de espesores tal como se nota en los cortes realizados.

Figura 110. Distribución de espesores COF lámina-plug 0.3.

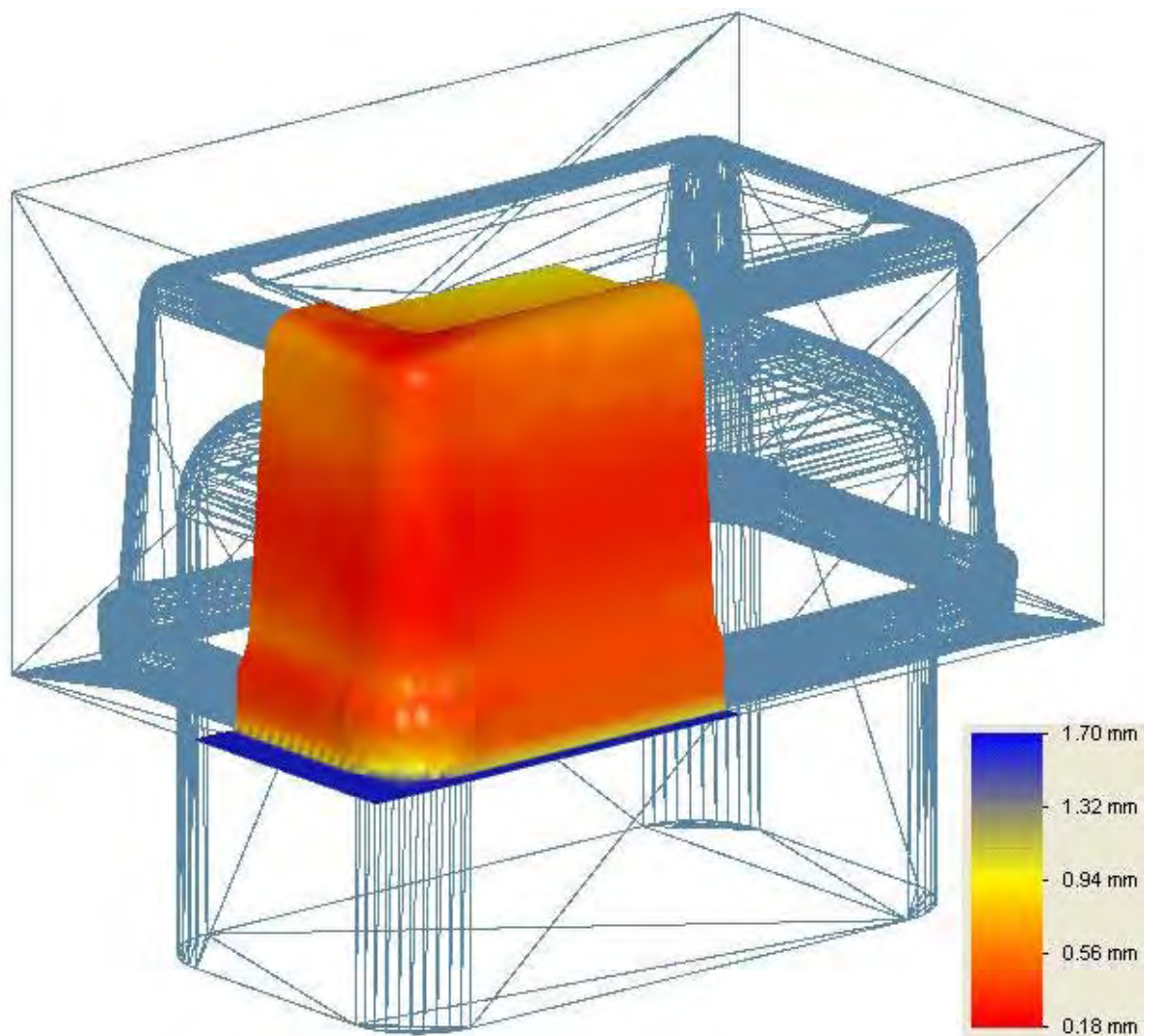


Figura 111. Distribución de espesores COF lámina-plug 0.7.

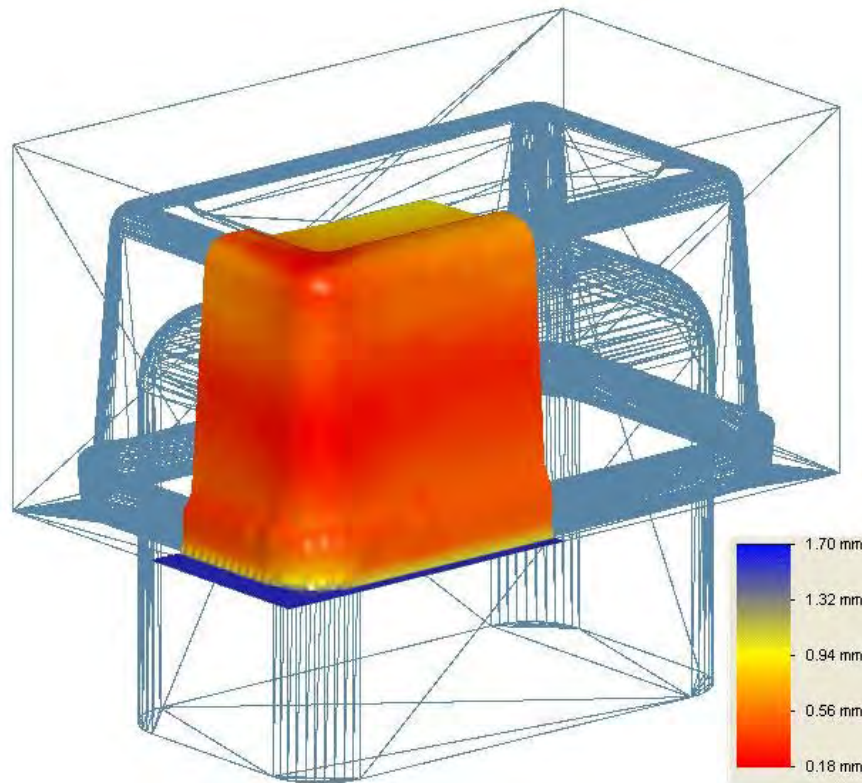


Figura 112. Distribución de espesores en $X = 0$ COF lámina-plug.

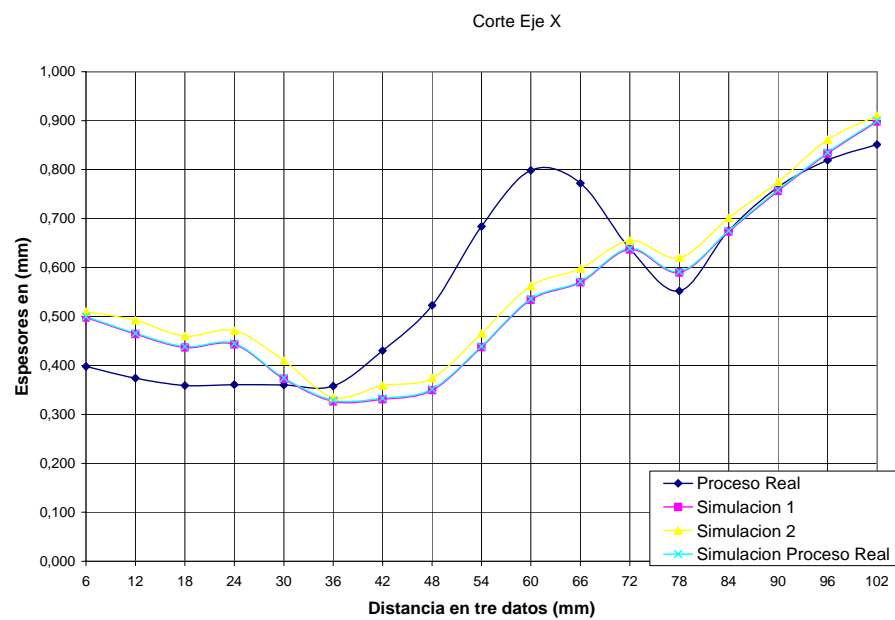


Figura 113. Distribución de espesores en $Y = 0$ COF lámina-plug.

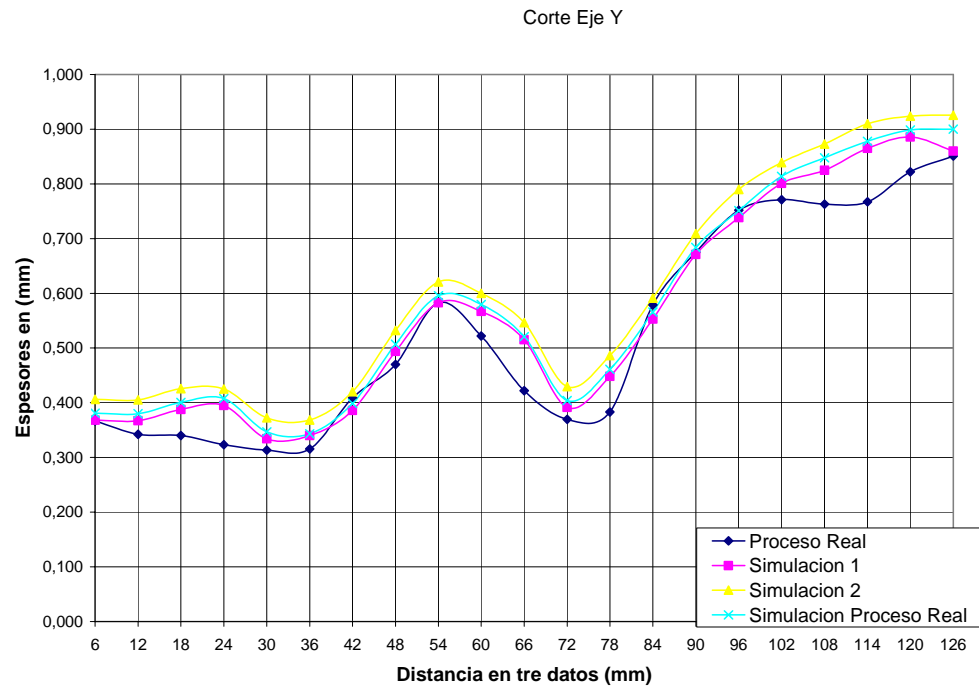
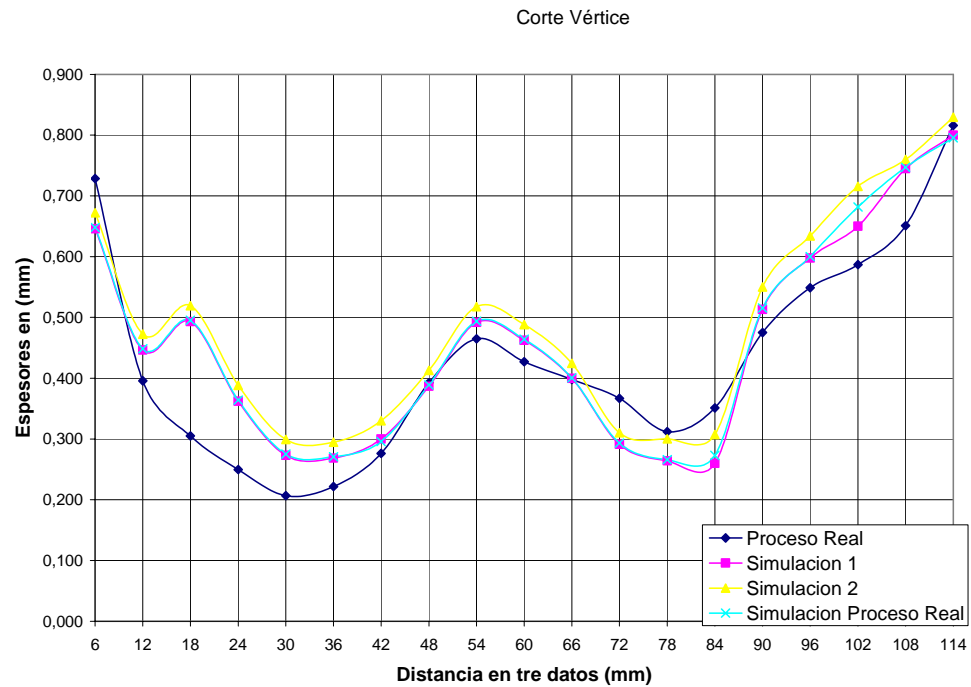


Figura 114. Distribución de espesores en el vértice COF lámina-plug.

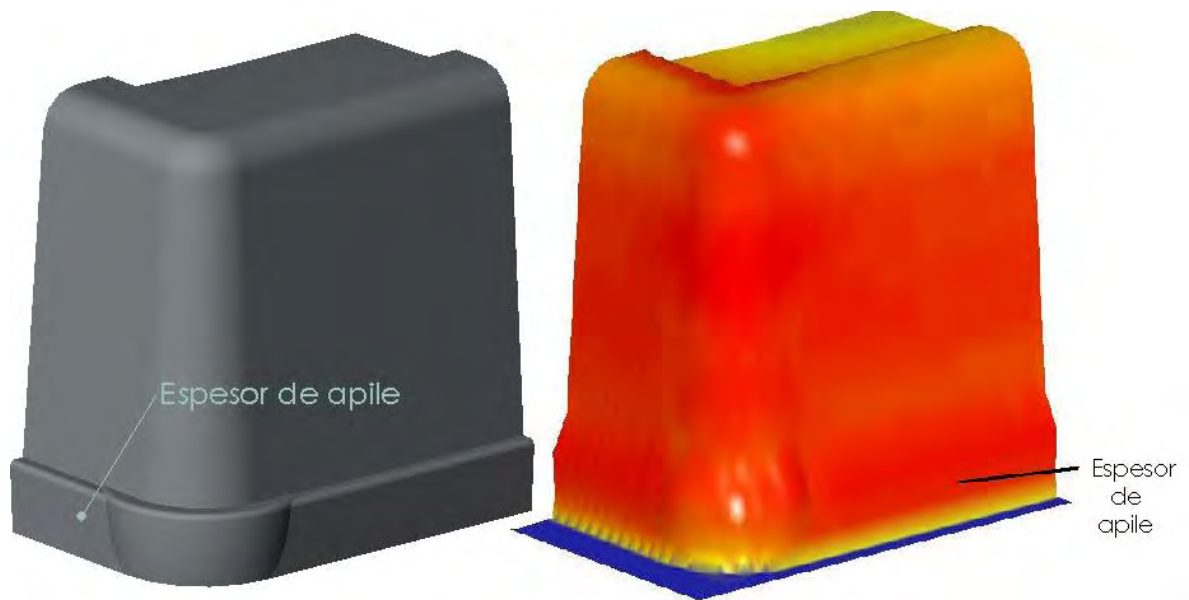


9.17 CAVIDAD DEL MOLDE

La influencia generada por la cavidad del molde, es el resultado del producto final, ya que de ésta depende cual será la forma que deberá copiar la lámina cuando el aire de formado entre y la adhiera a las paredes de la cavidad.

También puede ocurrir que por el diseño mismo de la cavidad se presenten zonas en donde la lámina no copia la forma de la cavidad como se presentó en este caso de estudio, en donde la lámina no formaba bien el espesor de apile en la base rectangular 500 g. como se muestra en la figura 115.

Figura 115. Espesor de apile.



10. MODELO KBKZ

El termoformado es un proceso usado ampliamente para producir partes y productos que requieran una pared delgada a un costo relativamente bajo. En este proceso se ejerce una presión que rápidamente deforma la suave lámina del polímero hasta que ésta entra en contacto con la superficie del molde. La parte formada es usualmente sostenida contra la superficie del molde por una presión diferencial para facilitar el enfriamiento y reducir la contracción final, después de la cual es capaz de mantener la forma recientemente adquirida.

Comparada con otros procesos de transformación de polímeros, se ha brindado muy poca atención al control de proceso y simulación del termoformado. La mayor parte de los desarrollos comerciales dependen de las pruebas de ensayo y error, las cuales consumen mucho tiempo y dinero, para determinar si la geometría y calidad deseadas del producto se pueden alcanzar. Aplicaciones técnicas avanzadas desafían tanto la capacidad tecnológica del termoformado como la exactitud de las predicciones dimensionales de la simulación. El trabajo empírico y analítico adicional es necesario para apoyar el desarrollo comercial de productos, reducir el costo de diseño y manufactura, y obtener mayor control sobre el proceso en sí.

Modelos de materiales.

Los modelos matemáticos son típicamente aplicados para representar el comportamiento elástico y/o viscoelástico de los materiales poliméricos en las simulaciones. Un acercamiento del comportamiento de los materiales está basado en el modelo constitutivo elástico desarrollado por Rivlin, donde la energía de tensión es asumida para ser una función de invariantes de tensión. Otro modelo elástico es el desarrollado por Ogden, donde la función de energía de tensión es

dada por estiramientos principales, en lugar de usar los invariantes de tensión. Aunque el modelo de Odgen parece tener un significado más físico al utilizar directamente estiramientos de cercha, sus términos de parámetros no lineales complican el ajuste experimental significativamente. Delorenzi y Nied desarrollaron otro modelo que incluye los efectos elásticos no lineales para elementos finitos. Existe también un acercamiento basado en la conservación de masa y la geometría del molde, desarrollado por Rosenzweig, Narkis, y Tadmor, que produce una aproximación buena a la distribución de espesores. Estos estudios muestran que la distribución de espesores no es altamente dependiente a las propiedades del material pero si a la geometría del molde. Sin embargo, las propiedades del material pueden tener una gran influencia sobre la presión y el tiempo de aplicación del aire de formado, la estabilidad numérica, los perfiles de tensiones residuales y la contracción final.

Cuando la lámina de polímero es calentada por encima del punto de fusión cristalino, se comporta más viscosa que una burbuja hiper elástica. Las relajaciones de tensión, que ocurren durante todo el proceso de formado, están altamente relacionadas con los efectos de la temperatura. La complejidad involucrada al añadir la viscosidad da como resultado numerosos coeficientes de material indeterminados y grandes requerimientos de caracterización de materiales. Aunque las propiedades y modelos viscoelásticos de los materiales no tienen una influencia dominante sobre la predicción final de espesores, un eficiente modelo matemático del material que incluya viscosidad es necesario para evaluar los perfiles de tensión y los resultados de contracción. Recientes estudios significativos se han dedicado a simplificar la expresión viscoelástica del comportamiento del material. La forma básica del modelo de Tiempo - Tensión y el método numérico para la evaluación de relajación es ampliamente usado en la simulación por FEA (análisis de elementos finitos) del proceso de termoformado. Una forma mas avanzada del modelo Tiempo-Tensión, el modelo Kaye-Bernstein-

Kearsley-Zapas, se está volviendo mas relevante a pesar de la complejidad en su implementación.

El uso del modelo KBKZ reduce los requerimientos de caracterización del material y elimina los errores potenciales derivados de utilizar diferentes modelos constitutivos entre las simulaciones de formado y de contracción. El modelo KBKZ tiene una forma general:

$$\sigma(t) = A(\lambda(t), t) + \int_0^t B(\lambda(t)\lambda(\tau), t - \tau) dt$$

Donde,

$\sigma(t)$, Tensor de tensión

A ,

$\lambda(t)$, Dedo del tensor de tensión para elongaciones biaxiales

t , Tiempo

τ , Tiempo de relajación

B , Dedo del tensor de tensión

Para estiramiento uniaxial, la tensión de elongación está dada por:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t \mu(t - t') \cdot h(I_1 - I_2) \cdot B(t, t') dt'$$

Donde,

$\sigma(t)$, Tensor de tensión

t , Tiempo

τ , Tiempo de relajación

B , Dedo del tensor de tensión

$\mu(t-t')$, Función de memoria del material en el tiempo

$h(I_1 - I_2)$, Función de amortiguamiento de los dos invariantes de tensión I_1, I_2

La función de memoria del material en el tiempo

$$\mu(t-t') = \sum_{k=1}^N \left[\frac{a_k}{\tau_k} \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_k}\right) \right]$$

Donde,

a_k , Módulos de relajación

τ_k , Tiempos de relajación

N , Numero de pares del modulo de tiempo

Dada la respuesta en el tiempo del modulo de relajación, $G(t)$, para una temperatura y de referencia y pequeñas tensiones, el correspondiente $\mu(t)$ es la derivada de $G(t)$:

$$\mu(t) = G'(t) = \frac{d}{dt} \left[\sum_{i=1}^N \alpha_i \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \right]$$

La función de amortiguamiento tiene comúnmente una de las siguientes tres formas:

$$h(I_1, I_2) = \frac{1}{1 + \alpha \sqrt{(I_1 - 3)(I_2 - 3)}}$$

$$h(I_1, I_2) = \frac{1}{\exp(\beta \cdot \sqrt{\alpha I_1 + (1 - \alpha) \cdot I_2 - 3})}$$

$$h(I_1, I_2) = \frac{\alpha}{(\alpha - 3) + \beta \cdot I_1 + \beta \cdot I_2}$$

Las cuales están dadas por dos invariantes escalares I_1 , I_2 y el material y la temperatura dependen de los parámetros α y/o β . El dedo del tensor de tensión $B(t, t')$, el cual es una función de la variación de tensión, se define como:

$$B(t, t') = \begin{bmatrix} \lambda^2(t, t') & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{2m}(t, t') & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^{-2(1+m)}(t, t') \end{bmatrix}$$

Donde $m = -1/2$ para elongaciones uniaxiales, $m = 0$ para extensiones planares y $m = 1$ para extensiones equibiaxiales.

Una forma de incluir los efectos de la temperatura en el modelo KBKZ es usar la función cambiante WLF dada por Williams, Landel y Ferry,

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}$$

Donde C_1 y C_2 son constantes del material que pueden ser derivadas de los datos de relajación, y T_0 es la temperatura de referencia.

Caracterización del material.

El modelo KBKZ describe la relación esfuerzo-deformación de los polímeros bajo diferentes tasas de tensión. La no linealidad del modelo hace que los parámetros se interrelacionen altamente. El ajuste del modelo KBKZ se logra al comparar la predicción de la relación esfuerzo-deformación con las observaciones experimentales. Los parámetros son derivados cuando el objetivo de minimizar los errores de predicción es alcanzado.

11. CONCLUSIONES

La utilización del software T-SIM adquiere una importancia mas relevante cuando se trata de desarrollar nuevas piezas o productos, esto debido a que en la etapa de desarrollo es muy conveniente acercarse al ideal del producto y luego, ya en proceso real, hacer los correctivos pertinentes para alcanzar el diseño deseado. En cambio, la mejora de un producto ya existente es mas compleja, debido a que la toma de datos reales es algo complicada, por lo cual al realizar la simulación con dichos datos se está partiendo de datos que podrían no ser los ideales.

Por otro lado, la influencia de las variables tal como se detalló en este trabajo, puede variar en la medida en que varios parámetros de proceso puedan ser alterados a la vez, lo cual genera un sin fin de posibilidades de cambio en la simulación.

La mayor aplicación que se le puede dar al software es el simular los diferentes diseños de la forma del plug, ya que es la forma del plug el parámetro de proceso que tiene mayor incidencia sobre la distribución de espesores del producto final.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test method for static and kinetic coefficients of friction of plastic film and sheeting. ASTM: Pittsburgh, 1987. 5 p. : il. (ASTM D 1894)

BODINI, Gianni y PESAN, Franco Cacchi. Moldes y máquinas de inyección para la transformación de plásticos. Segunda edición. México: Mc. Graw Hill, 1992. 435 p. ISBN 970-10-102-7.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Bogotá: ICONTEC, 2002. 33 p. : il (NTC 1486)

----- . Documentación. Guía para numeración de divisiones y subdivisiones en documentos escritos. Bogotá: ICONTEC, 2001. 4 p. (NTC 1075)

----- . Documentación. Referencias bibliográficas para libros, folletos e informes. Bogotá: ICONTEC, 1996. 15 p. (NTC 1160)

----- . Documentación. Referencias bibliográficas para normas. Bogotá: ICONTEC, 1996. 6 p. (NTC 1307)

----- . Documentación. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas.. Bogotá: ICONTEC, 1998. 23 p. (NTC 4490)

MILLS, Anthony F.. Transferencia de calor. Santa Fe de Bogotá: Mc Graw Hill, 1997. 932 p. ISBN 84-8086-194-0.

OTERO, Juan Carlos. Simulación de procesos de termoformado con el software T-SIM. Cali: Universidad autónoma de occidente, 2004. 71 p.

ROSATO, Dominick V.; ROSATO, Donald V. Y ROSATO, M.G.. Plastics design handbook. Kluwer academics publishers, 2001. 703 p. ISBN 1-59124-258-4.

SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS. ANTEC annual technical conference Plastics: Plastics saving planet earth. Toronto: Society of plastics engineers, 1997. v.1. 1776 p. ISBN 1-59124-551-6.

----- . ANTEC annual technical conference Plastics: Plastics saving planet earth. Toronto: Society of plastics engineers, 1997. v.2. 2125 p. ISBN 1-59124-552-4.

----- . ANTEC annual technical conference Plastics: Bridging the millennia. Nueva York: Society of plastics engineers, 1999. v.1. 1491 p. ISBN 1-59124-008-5.

----- . ANTEC annual technical conference Plastics: Bridging the millennia. Nueva York: Society of plastics engineers, 1999. v.2. 1361 p. ISBN 1-59124-009-3.

----- . ANTEC annual technical conference Plastics: The magical solution. Orlando: Society of plastics engineers, 2000. v.1. 1415 p. ISBN 1-59124-011-5.

----- . ANTEC annual technical conference Plastics: The magical solution. Orlando: Society of plastics engineers, 2000. v.2. 1142 p. ISBN 1-59124-012-3.

----- . ANTEC annual technical conference Plastics: the lone star. Dallas: Society of plastics engineers, 2001. v.1. 1338 p. ISBN 1-59124-016-6.

----- . ANTEC annual technical conference Plastics: the lone star. Dallas: Society of plastics engineers, 2001. v.2. 1029 p. ISBN 1-59124-015-8.

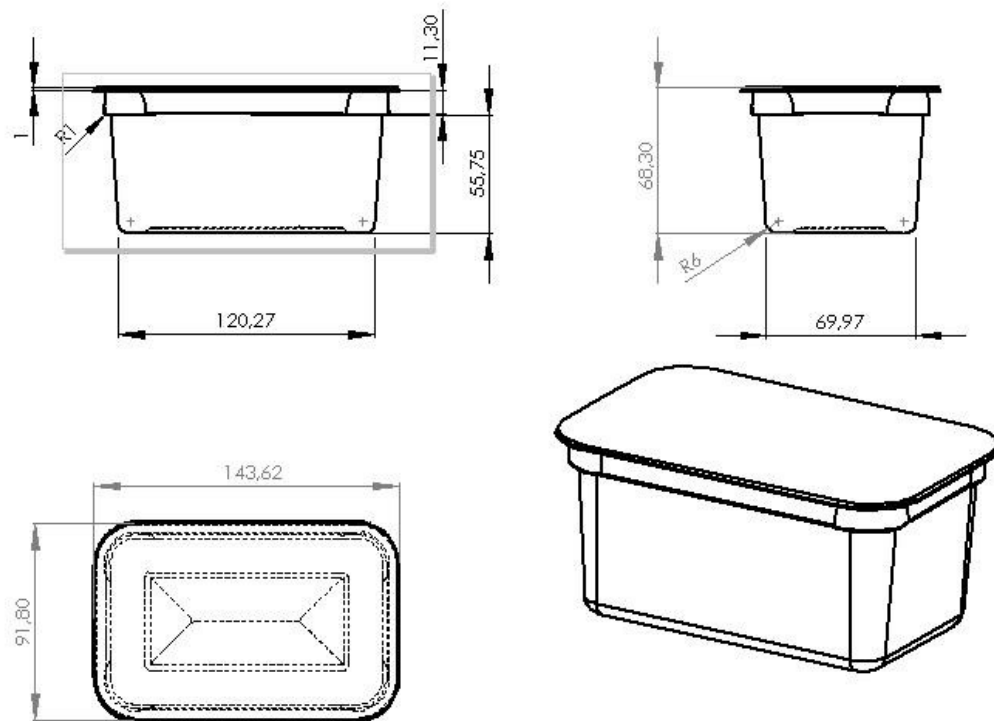
-----, ANTEC annual technical conference. San Francisco: Society of plastics engineers, 2002. v.1. 1295 p. ISBN 1-59124-394-7.

-----, ANTEC annual technical conference. San Francisco: Society of plastics engineers, 2002. v.2. 1590 p. ISBN 1-59124-396-3.

-----, ANTEC annual technical conference. Nashville: Society of plastics engineers, 2003. v.1. 1281 p. ISBN 1-59124-609-1.

-----, ANTEC annual technical conference. Nashville: Society of plastics engineers, 2003. v.2. 1299 p. ISBN 1-59124-610-5.

ANEXO A. PLANO BASE RECTANGULAR 500 g.



DWG. N.º.	Base rectangular 500 g		Medidas mm
\$ CALE: 12	Material: Acero inoxidable		

ANEXO B. FICHA TÉCNICA DE CALIDAD DE LA BASE RECTANGULAR 500 g

OBJETIVO

Determinar las especificaciones de calidad da la base rectangular 500 g..

DESCRIPCIÓN Y APARIENCIA DE PRODUCTO

Base blanca, de calibre uniforme, sin aromas extraños, libre de daños físicos, huellas, vetas, manchas, etc., que afecten la apariencia. Prefabricado mediante el proceso de termoformado.

Material: Polipropileno blanco 03H83 de PROPILCO

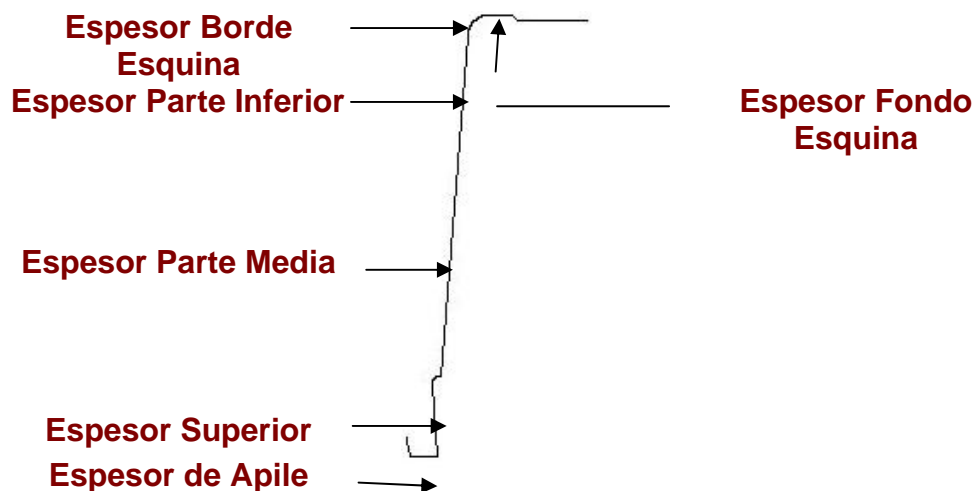
Espesor de la lámina: 1.44 ± 0.01 mm

Peso del producto : 16.8 ± 0.4 g.

Espesores :

- Espesor Apile: 0.40 ± 0.10 mm
- Espesor superior: 0.45 ± 0.10 mm
- Espesor parte media: 0.35 ± 0.10 mm
- Espesor parte inferior: 0.50 ± 0.15 mm
- Espesor borde esquina: 0.23 ± 0.03 mm
- Espesor fondo esquina: 0.35 ± 0.05 mm

Figura A. Espesores de la base rectangular 500 g.



ANÁLISIS DIMENSIONAL

Largo: 141.5 ± 0.5

Ancho: 91.8 ± 0.5

Altura total: 67.5 ± 0.5

COMPRESIÓN

Resistencia a la compresión después de 48 H termoformado el producto: 170 N.

ANEXO C. FICHA TÉCNICA HYTAC

HYTAC - B1X

Tough Easily Machined Syntactic Tooling

Technical Bulletin

Overview

Hytac B1X is the first plug assist material to combine the toughness of engineering thermoplastics with the low thermal conductivity of a syntactic foam. Plug assists made from Hytac B1X will resist the chips and dings associated with production abuse while reducing mark-off and sticking of difficult to process polymers. Hytac B1X maintains the high thermal stability required to process today's thermoformed polymers. In addition, Hytac B1X eliminates the machining difficulties of conventional syntactic foams. This product does not produce dust during machining and finishing of plugs.

- **High Toughness and Durability** With high toughness, machine downtime due to damaged plugs is reduced. Less downtime = lower costs = more consistent quality.
- **Superb Machinability** No dust collection equipment or respirators are required due to the large, non-abrasive chips. Plugs can be machined over three times faster than syntactic foam due to the easy chip formation. No more complaints from your machinists.
- **Excellent Temperature Resistance** HYTAC-B1X is specially formulated for service up to 350°F with minimal loss in mechanical properties.
- **Variety of Shapes and Sizes** The material is provided in standard sized rods or sheets, but may be custom molded to meet your specific needs.

Applications HYTAC may be used in a wide variety of applications on sheet-fed, rotary, or in-line machines. It may also be used with most commonly thermoformed materials, as well as some of the more exotic materials available today.

Typical Properties

Property	HYTAC-B1X
Color	Light Blue
Density (ρ)	43-47 lb/ft ³ [740 kg/m ³]
Thermal Conductivity (k)	0.13 BTU /hr-ft-°F [0.22 W/m°K]
Specific Heat (Cp) per mass	0.43 BTU/(lb•°F) [1.80 kJ/(kg•°C)]
Coefficient of Thermal Expansion (CTE)	28 x 10 ⁻⁶ in/in/°F [50 x 10 ⁻⁶ m/m/°C]
Compressive Strength	6,300 psi [43.4 Mpa]
Compressive Modulus	180 Ksi [1.24 Gpa]
Service Temperature	350 °F [180 °C]

ANEXO D. NORMA ASTM D1894 MÉTODO ESTANDAR PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN ESTÁTICA Y CINÉTICA EN LÁMINAS DE PLÁSTICO.

1. ALCANCE

Este método de prueba cubre la determinación de los coeficientes de fricción al principio y durante el deslizamiento de la película plástica cuando éstas se deslizan sobre sí mismas o sobre otra superficie en condiciones de prueba específicas. Este procedimiento se realiza con el uso de un trineo estacionario y un plano móvil o un trineo móvil y un plano estacionario. Ambos métodos dan el mismo resultado.

1.2 DISPOSITIVOS

1.2.1 Trineo: Se utiliza un bloque cuadrado de 63.5 mm^2 por 6 mm de espesor aproximadamente, el cual tiene un tornillo asegurado en unos de sus extremos. Cuando una película flexible es adherida, el bloque es envuelto en con un caucho esponjoso de 63.5 mm de ancho y 3.2 mm de espesor. La espuma debe ser flexible, con una superficie lisa y tener una densidad nominal de 0.25 g/cm^3 de acuerdo a los métodos de prueba de densidad D3574. La presión requerida para comprimir la espuma en un 25 % es de $85 \pm 15 \text{ KPa}$. La espuma deberá tener también una alta histéresis cuando se deforme. El caucho será envuelto alrededor del trineo con una cinta de enmascarar de doble cara. Cuando la lámina es adherida, la cinta de doble cara será usada para pegar la muestra. El peso total del trineo y la muestra debe ser de $200 \pm 5 \text{ g}$.

1.2.2 Plano: Se utiliza un plano de plástico pulido, madera o lámina de metal de 150 mm por 300 mm por 1 mm. Para proveer un soporte liso para la muestra se puede utilizar un pedazo de vidrio plano y liso sobre la superficie del plano.

1.2.3 Tijeras: Se utilizan para cortar las muestras de acuerdo a las dimensiones requeridas.

1.2.4 Filamentos de nylon: Tienen un diámetro de 0.33 ± 0.05 mm y pueden soportar una carga de 3.6 Kg..

1.2.5 Poleas de baja fricción: Son poleas montadas en un cono de acero duro.

1.2.5 Dispositivo de medición de fuerza: Es un dispositivo capaz de medir la fuerza de fricción con un margen de error del 5%. Se puede utilizar una máquina universal de pruebas.

1.2.6 Base de soporte: Es una base lisa de metal o madera de aproximadamente 200 mm por 380 mm, la cual es necesaria para soportar el plano. La base de soporte puede ser una simple caja rectangular.

1.2.7 Dispositivo de halado del trineo: El plano puede ser halado por par de rodillos de caucho no menores a 200 mm de longitud, capaces de mantener una velocidad de superficie uniforme de 150 ± 30 mm/min.

1.2.8 Muestras de prueba: La muestra utilizada en la prueba deberá ser cortada aproximadamente 250 mm en la dirección de la máquina y 130 mm en la dirección transversal.

La muestra de película utilizada en la prueba deberá ser atada al trineo y debe ser cortada en cuadrados de 120 mm de lado. La película debe ser una lámina con un espesor inferior a 0.254mm de acuerdo a la norma D 883.

Las muestras de lámina deben ser planas y libres de quiebres. Los bordes deben ser redondeados y lisos.

Por cada especificación se utilizarán 5 muestras.

1.3 PREPARACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

La figura 1 muestra 5 formas de ensamblar los dispositivos. Las bases de soporte para todos los soportes deben estar niveladas.

Si los dispositivos de la Fig. 1 (a) o (b) es usado se debe calibrar la escala del spring-gage de siguiente forma:

- Monte la polea de baja fricción frente al spring-gage.
- Fije un extremo del nylon al spring-gage, pase el nylon sobre la polea y suspenda un peso conocido en el otro extremo del filamento de nylon.

La velocidad del dispositivo de la Fig. 1 debe ser ajustada a 150 ± 30 mm/min.. Esta velocidad debe ser revisada marcando una sección de 150 mm al lado del plano y determinando el tiempo requerido por el plano para recorrer esos 150 mm.

Si se utiliza una máquina universal (como en la Fig. 1 (c) y (d)), se selecciona la velocidad del cabezal de 150 ± 30 mm/min..

Figura 1. Formas de ensamblaje.

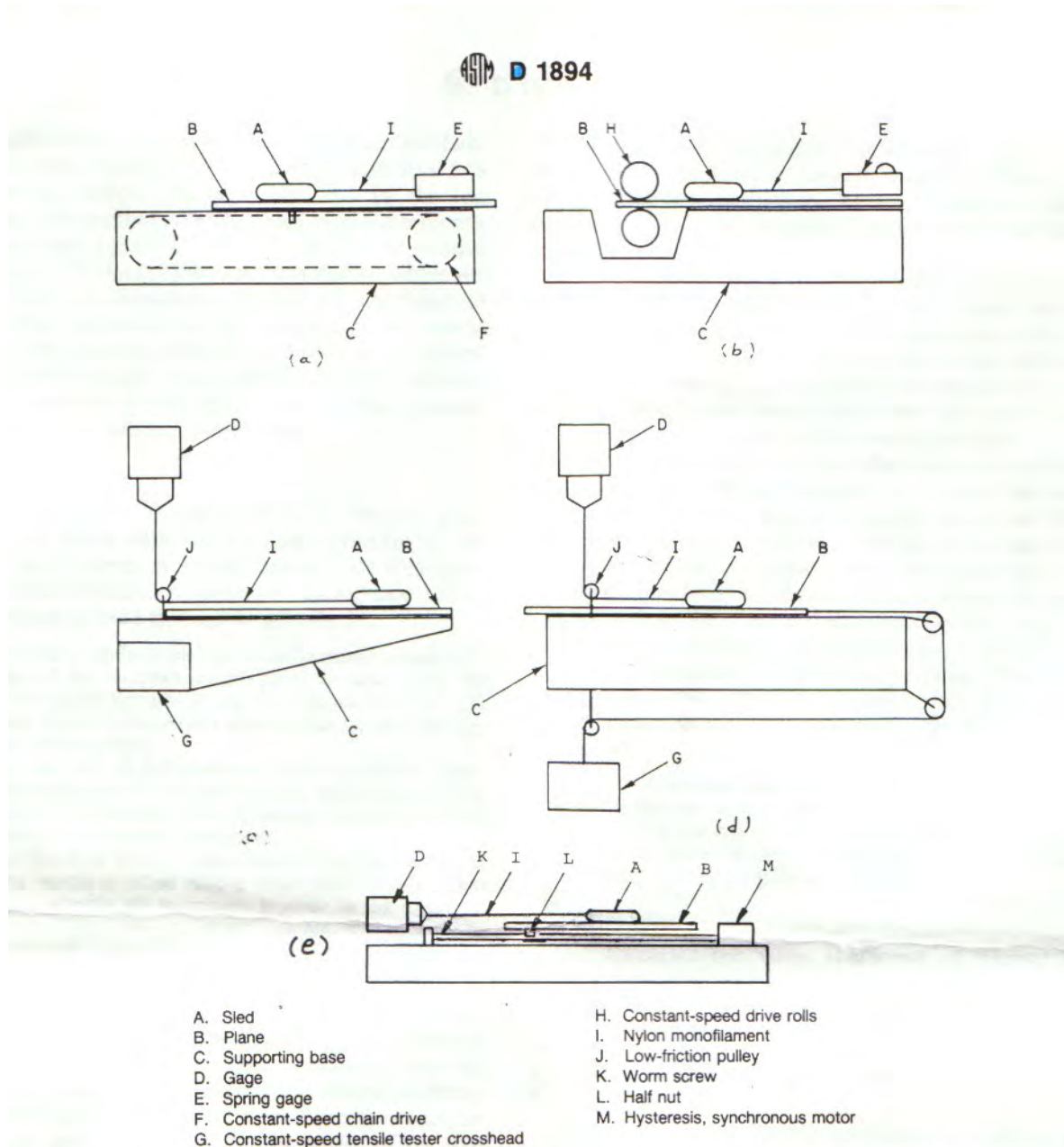


FIG. 1 Five Methods of Assembly of Apparatus for Determination of Coefficients of Friction of Plastic Film

Cuando el movimiento de la Fig. 1 (c) es usado, se debe limpiar la base de soporte para liberarla de material extraño y se deben poner 2 tiras de cinta de doble cara a lo largo de la longitud de la base de soporte.

Se debe arreglar el plano en posición sobre las franjas de la cinta y se pega firmemente.

1.4 CONDICIONES

3.1.4.1 Condiciones generales: Las condiciones de las muestras de prueba de 23 ± 2 °C y 50 ± 5 % de humedad relativa no deben exceder las 40 horas para hacer la prueba de acuerdo a los métodos de procedimiento D 618.

3.1.4.2 Condiciones de pruebas: Las condiciones de prueba deben ser las condiciones estándar de laboratorio a temperatura ambiente, es decir, 23 ± 2 °C y 50 ± 5 % de humedad relativa, a menos que la prueba requiera otras condiciones.

3.1.5 Procedimiento

- Pegue la lámina de 250 por 130 mm al plano asegurándose que la dirección de la máquina está en la dirección de los 250 mm.
- Pula la lámina para eliminar arrugas.
- Pegue los bordes de la película cuadrada de 120 mm de lado a la parte de atrás del trineo, usando cinta adhesiva y halando la muestra fuertemente (sin estirla) para eliminar arrugas. Para las muestras de lámina, pegue la lámina cuadrada de 63.5 mm de lado a la cara del trineo con la cinta de doble cara. Mantenga la dirección de la muestra paralela a la longitud del trineo (si la dirección es fácilmente identificable).
- Atar la muestra cubierta al trineo amarrando el nylon al tornillo del trineo. Si la prueba es realizada con una máquina universal de ensayos, pase el nylon a través de las poleas y llévela a la parte de abajo del dispositivo sensor y átelo firmemente. Si se utiliza un spring-gage, asegure el nylon a él. El nylon debe ser lo suficientemente largo para cubrir el recorrido del

trineo. El trineo, la longitud del nylon y la dirección de la máquina deben ser paralelos.

- Encienda el mecanismo de movimiento. Como resultado de la fuerza de fricción entre las superficies en contacto, no habrá un movimiento relativo inmediato entre el trineo y el plano móvil hasta que la fuerza de halado en el trineo iguale o exceda la fuerza de fricción estática actuante entre las superficies en contacto. La fuerza máxima registrada será identificada como la componente de la fuerza del coeficiente estático de fricción.
- Lea la fuerza promedio durante una carrera de aproximadamente 130 mm mientras las superficies se están deslizando uniformemente una sobre la otra. Esta fuerza es equivalente a la fuerza cinética requerida para sostener el movimiento entre las partes y generalmente es menor a la fuerza estática requerida para iniciar el movimiento. Luego de que el trineo ha recorrido los 130 mm apague el dispositivo y regrese el trineo a su posición inicial.

1.6 CÁLCULOS

1.6.1 Cálculo del coeficiente de fricción estático μ_s

$$\mu_s = A_s/B$$

Donde,

A_s = Lectura de la escala en el momento de iniciar el movimiento (g)

B = Peso del trineo (g)

3.1.6.2 Cálculo del coeficiente de fricción cinético μ_k

$$\mu_k = A_k/B$$

Donde,

A_k = Lectura promedio obtenida durante el recorrido del desplazamiento entre las superficies (g).

B = Peso del trineo (g).

1.6.3 Calcule la media aritmética de cada sección de la observación.

1.6.4 Calcule la desviación estándar de los valores obtenidos.

